

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**“COMPONENTES HIDROLÓGICOS Y TENDENCIAS DE
FLUJOS EN EL ESTADO DE MICHOACÁN, MÉXICO”**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

HUMBERTO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE DEL 2005

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**“COMPONENTES HIDROLÓGICOS Y TENDENCIAS DE FLUJOS
EN EL ESTADO DE MICHOACÁN, MÉXICO”**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PÁRA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

HUMBERTO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

COMITÉ DE TESIS

**Dr. José de Jesús Nívar Cháidez
DIRECTOR**

**Dr. Humberto González Rodríguez
ASESOR**

**Dr. Eduardo Javier Treviño Garza
ASESOR**

**Dr. J. Jesús García Magaña
ASESOR EXTERNO**

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE DEL 2005

DEDICATORIA

A Dios:

Que me ha regalado el don de la vida y me ha permitido llegar hasta este día.

A mis Padres:

Miguel Hernández Nava y Beatriz González Juárez, quien junto con Dios me dieron la vida y me han brindado todo su cariño, apoyo y comprensión durante mis años de preparación. A ellos todo mi amor.

A mis hermanos:

Antonio, Teresa, José Luís, Maria Luisa, Virginia, Rosa, Miguel, Beatriz y Francisca que siempre me han brindado su gran apoyo, comprensión y cariño. Les agradezco por todo el amor que me tienen.

A mis compañeros y amigos:

Rolando Orozco, Jesu Rodríguez, Rodrigo Rodríguez, José A. Díaz, Jesús de León, Raúl Espinoza, Julio C. Rios, José Dueñez, , Eliud Morales, Rafaela Arreola, Olga L. Lopez, Enrique Merlín, Carlos Monroy, , Armando López, Eduardo de los Rios⁺, Ramón Jiménez ⁺ , Francisco Gallegos⁺ y Guillermo Hurtado, gracias por compartir juntos tantos momentos y por sus consejos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, que me ha permitido culminar mis estudios de Maestría en Ciencias Forestales.

A la Facultad de Ciencias Forestales por la oportunidad para formar parte de su Programa de Maestría y por los conocimientos brindados a través de su personal académico, técnico y trabajadores.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios.

Al Dr. José de Jesús Návar Chaidez, quien ha sido un excelente asesor y amigo. A usted mi mas sincero agradecimiento.

Al Dr. Humberto González Rodríguez y Dr. Eduardo Javier Treviño Garza, quien con sus atinadas observaciones han mejorado este trabajo.

Al Dr. J. Jesús García Magaña y Dra. Ma. Ercelia Ángel Palomares , quienes me ha impulsado y animado a continuar con mis estudios de maestría.

ATLAS HIDROLÓGICO DEL ESTADO DE MICHOACÁN, MÉXICO: ESTIMACIONES PRELIMINARES

RESUMEN

En este reporte de investigación se presenta información de los componentes del ciclo hidrológico de las precipitaciones mensuales, anuales y diarias modeladas a través de varias funciones de densidad probabilística. Se presentan también las evapotranspiraciones anuales estimadas por el procedimiento Thornthwaite y los caudales anuales modelados por la distribución probabilística lognormal.

ABSTRACT

In this technical report, we present information on the components of hydrologic cycle of the daily, monthly, and annual precipitation modeled by several probabilistic density functions. We also present the annual evapotranspiration estimated by the method of Thornthwaite and the annual discharge modeled by the lognormal probabilistic density function.

INTRODUCCION

El uso del agua en los sectores domestico, agrícola e industrial es el servicio más importante desde el punto de vista humano que provee los sistemas de agua dulce del mundo. La humanidad extrae $4,000 \text{ km}^3$ de agua cada año o cerca del 20% del flujo base de los ríos del mundo (Shiklomanov, 1997) para satisfacer estos usos. Entre 1900 y 1995 las extracciones aumentaron por un factor de 6, mientras que la tasa de crecimiento de la población mundial solo se duplicó (WMO, 1997). En general, existen de $39,500$ a $42,500 \text{ km}^3$ de escorrentía en ríos en total, pero solo $9,000 \text{ km}^3$ se encuentran al alcance de la humanidad y de estos $3,500 \text{ km}^3$ de agua se encuentran almacenados en lagos (WMO, 1997). Por otra parte, las regiones áridas y semi-áridas cubren el 40%

de la superficie terrestre pero solo producen el 2% de la escorrentía superficial (WMO,1997).

Muchas regiones del mundo poseen en general abundantes recursos hidrológicos dulces, sin embargo 4 de cada 10 habitantes viven actualmente en cuencas hidrológicas que están presentando escasez de agua para satisfacer las demandas convencionales. Se espera que para el año 2025 al menos 3,500 millones de habitantes (entre el 40-50% de la población mundial) enfrentaran problemas de escasez de agua (Johnson *et al*, 2001) y esta escasez se agudiza por problemas de contaminación.

El crecimiento demográfico se estima en 7,800 millones de habitantes para el año 2025 (UNDP, 1999). Para alimentar la población, se espera que aumente la producción agropecuaria y por consiguiente mayor superficie irrigada y mayor cantidad de agua destinada al sector. En el presente, 40% de la producción agrícola proviene del 17% de la superficie irrigada (WMO, 1997). En términos generales, la agricultura utiliza en total el 70% del agua dulce extraída (Postel, 1993). En países en desarrollo 90% del agua municipal se descarga en ríos, sin ningún tratamiento previo (WMO, 1997). La contaminación por diversas fuentes disminuye la disponibilidad de agua y los servicios ambientales que provee.

El umbral de la abundancia y el estrés se estima en $1,700 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1} \text{ hab}^{-1}$ ($4,657 \text{ litros día}^{-1} \text{ hab}^{-1}$) . Por debajo de $1,000 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1} \text{ hab}^{-1}$ ($2,793 \text{ litros día}^{-1} \text{ hab}^{-1}$) se presentan problemas severos con menor producción agrícola y desarrollo económico a menos de que la región tenga recursos suficientes para la aplicación de tecnologías para uso, conservación y reciclamiento del agua (Johnson *et al*, 2001). Las tecnologías de desalinización o reclamación de aguas residuales son aun caras y se utilizan preferencialmente en países ricos.

Otras preocupaciones son que entre 1,000 y 1,500 millones de habitantes viviendo en ciudades asiáticas y latinoamericanas obtienen suministros de acuíferos fósiles o contaminados. Cuencas semi-áridas con una estación seca definida, donde menos del 2% de la escorrentía total anual ocurre en la época de estiaje como el Balsas-Santiago y el Bravo tendrán problemas de suministro y de contaminación mas aguda para el 2020. La sociedad extrae aproximadamente el 20% del agua de los ríos pero en regiones áridas y semi-áridas esta proporción aumenta considerablemente. Por consiguiente los déficits de agua continuaran agudizándose en estas regiones del planeta (WMO, 1998; Johnson et al, 2001).

La República Mexicana en general también tiene problemas serios en cuanto al suministro de agua de calidad. En el país se utiliza el 15% del volumen de disponibilidad natural media de agua. Sin embargo, en la porción norte se utiliza más del 40% de la disponibilidad natural media, y es considerado por la Organización de las Naciones Unidas, como una fuerte presión sobre el recurso hídrico. Debido a su geografía y clima, en México destacan dos grandes zonas de disponibilidad, la primera de ellas que comprende el sur y sureste y la segunda el norte, centro y noroeste del país. La disponibilidad natural en la primera de ellas es 7 veces mayor que en el resto del país. Sin embargo, en la zonas norte y centro se asienta el 77% de la población, se genera el 85% del PIB y sólo se tiene el 32% de la disponibilidad natural media (CONAGUA, 2005).

En el país las cuencas más contaminadas son las del Valle de México, Lerma, Alto Balsas, Pánuco y el tercio inferior del río Bravo. El estado de Michoacán se encuentra localizado en las regiones hidrológicas Balsas y Lerma-Santiago-Pacífico, y estas regiones ejercen el 36% de grado de presión hacia los recursos hídricos totales. Por esta razón se justifica el desarrollo de modelos hidrológicos espaciales para el estado de Michoacán con el objetivo de presentar los componentes del ciclo hidrológico como es la precipitación,

evapotranspiración, caudales de los ríos, probabilidades de ocurrencia de lluvias y lluvias máximas que se pueden presentar en las cuencas del estado.

ANTECEDENTES

Návar y Rodríguez (2002) utilizaron ocho distribuciones probabilísticas en la estimación de precipitación y las presentaron mejor ajuste fueron exponencial y la gamma. Utilizaron la distribución gamma en la proyección de la precipitación para realizar balances hidrológicos en la cuenca del Río San Juan del nordeste de México.

Para el cálculo de la evapotranspiración el método de Thornthwaite usa la temperatura del aire como un índice de la energía disponible para la evapotranspiración, suponiendo que la temperatura del aire está correlacionada con los efectos integrados de la radiación neta y otros controles de la evaporación, y que la energía disponible es compartida en proporción fija entre el calentamiento de la atmósfera y la evapotranspiración (Dunne y Leopold, 1978).

Las estructuras diseñadas para controlar volúmenes de agua originados de la lluvia y de las corrientes necesitan criterios cuantitativos para determinar su tamaño. El volumen del flujo que debe ser almacenado o transportado por el sistema puede relacionarse matemáticamente con la precipitación, por lo tanto es necesaria una predicción de la precipitación para diseñar los almacenamientos y obras de ingeniería hidráulica. Los parámetros de intensidad y duración pueden ser estadísticamente relacionados a una frecuencia de incidencia. La representación gráfica de esta relación es la curva intensidad-duración-frecuencia (IDF). La curva IDF es una gráfica de la intensidad promedio contra la duración promedio para varias frecuencias (o periodos de retorno). Estos datos se usan para el diseño y la operación de conductos cerrados o abiertos, almacenamientos y estructuras protectoras de contaminación entre otros (Wanielista et al., 1997).

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez,1978). Según Benítez (2002), las curvas IDF son la representación gráfica de la relación existente entre la intensidad, la duración y la frecuencia o período de retorno de la precipitación. Para Mintegui *et al* (1990), se denominan Curvas Intensidad-Duración Frecuencia (IDF) a aquellas que representan duraciones en abscisas y alturas de precipitación en las ordenadas, en la cual, cada curva representada corresponde a una frecuencia (o período de retorno), de tal forma que las gráficas de las curvas IDF representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los de una misma curva, a un idéntico período de retorno. Estas técnicas no se encuentran disponibles para la República Mexicana por la falta de datos horarios de precipitación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio. El estado de Michoacán está situado en la región centro occidente de la República Mexicana entre las coordenadas geográficas extremas de 17°55' y 20°24' de latitud norte; y 100°04' y 103°44' de longitud oeste. Colinda al norte con los estados de Jalisco, Guanajuato y Querétaro; al este con Querétaro, México y Guerrero; al sur con Guerrero y el Océano Pacífico; al oeste con el Océano Pacífico, Colima y Jalisco. La extensión territorial que ocupa es de 5,883,695 ha, que corresponde al 3% de la superficie del país.

En el estado se encuentran dos grandes macizos montañosos que dan lugar a una gran diversidad topográfica. El Eje Neovolcánico Transversal situado al norte de la entidad y orientado de occidente a oriente y la Sierra Madre del Sur, originan entre ellas a la más grande de las cuencas del estado: la del río Balsas. Al norte, en las estribaciones del Eje, y colindando con Guanajuato, se encuentra el Bajío Michoacano, de gran importancia agrícola y al sur, colindando con el Océano Pacífico, la franja costera con gran potencial para la ganadería y la fruticultura. Sobre el Eje Neovolcánico se ubican los volcanes

Paricutín y el Jorullo, pero es el Pico de Tancítaro el de mayor altitud con 3,840 m.

Los climas predominantes son el templado, el cálido y los de transición. El primero domina en la parte norte del estado en aproximadamente el 30% de la superficie estatal, el cálido con sus variantes seco y subhúmedo domina en el sur en 44%, y las de transición en 26%, incluyendo en estos a los semifríos, que se encuentran en las partes más altas de las sierras.

Las temperaturas medias anuales van desde los 10 a 14°C en los climas semifríos y hasta los 28 a 29.5°C en los cálidos secos. La precipitación por el contrario va desde los 400 mm anuales en los climas cálidos secos, hasta los 1700 mm en los climas templados húmedos.

Los climas que prevalecen son el C(w2) que es un clima templado, subhúmedo, con temperatura media anual entre 12 y 18°C, y la temperatura del mes mas frío entre -3 y 18°C, y temperatura del mes mas caliente menor a 22°C, precipitación del mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. A continuación se describen los climas característicos del estado de Michoacán.

El BS1 (h') w es un clima semiárido calido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes mas frío mayor de 18°C, lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

EL Aw1 es el clima cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frío mayor de 18°C, precipitación del mes mas seco menor de 60 mm, lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total.

El Aw0 es el clima calido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frío mayor de 18°C, precipitación del mes mas seco

entre 0 y 60 mm, lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total.

El (A)C(w0) es el clima semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes mas frío menor de 18°C, precipitación del mes mas seco menor de 40 mm, lluvias de verano con índice P/t menor de de 43.2 y porcentaje de porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2%.

El (A)C(w1) es el clima semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes mas frío menor de 18°C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22°C , precipitación del mes mas seco menor de 40 mm, lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2%.

El C(w0) es el clima templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes mas frío entre -3 y 18°C, temperatura del mes mas caliente bajo 22°C, precipitación del mes mas seco menor a 40 mm, lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2.

El C(m) es el clima templado húmedo, temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes mas frío entre -3 y 18°C, precipitación del mes mas seco menor de 40 mm y temperaturas del mes mas caliente menor de 22°C, lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal entre 10.2% (Figura 1.1).

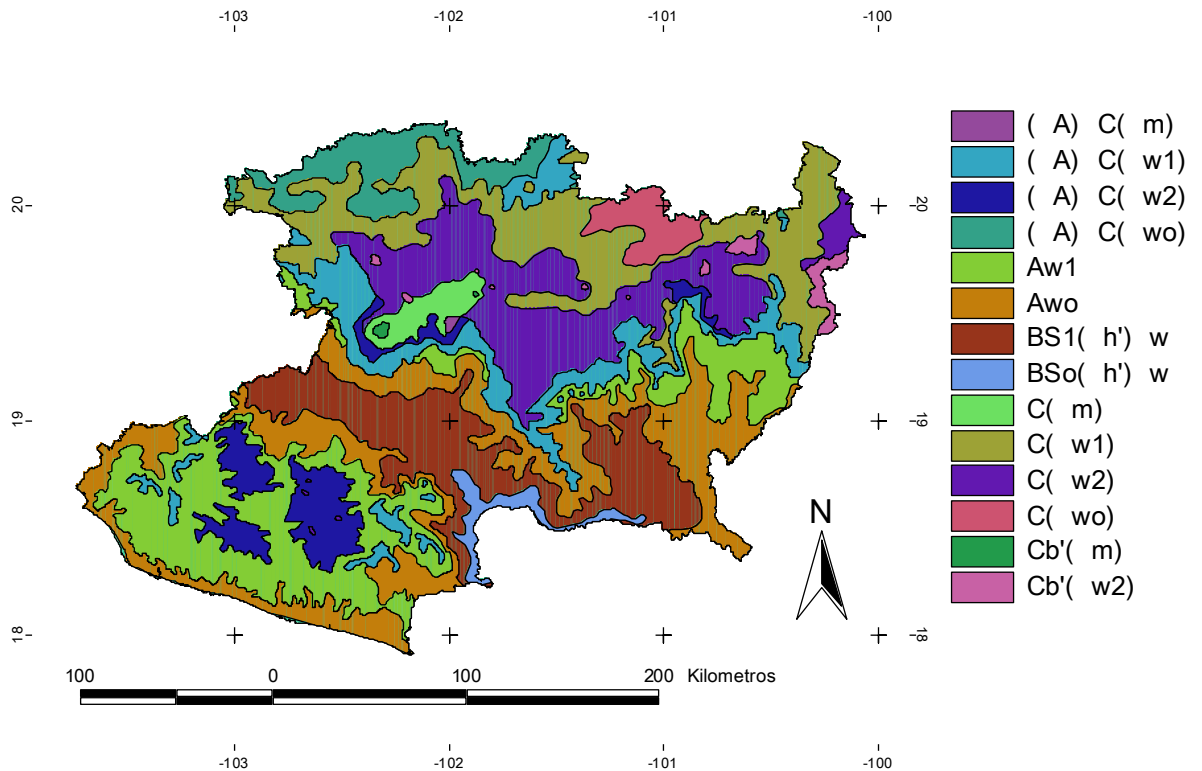


Figura 1.1 Climas del Estado de Michoacán

Vegetación. El estado de Michoacán presenta una vegetación muy variada por la diversidad de climas, suelos, altitudes y su posición entre dos grandes macizos montañosos y la presencia del Altiplano Mexicano, los grandes bajíos del centro y la zona del océano Pacífico.

Selva mediana subperennifolia. Se localiza a lo largo de la Vertiente del Pacífico, en planicies, cañadas, partes cercanas a los arroyos y abanicos aluviales, así como también dentro del Valle de Apatzingán en altitudes de 10 a 600 m. El clima dominante es cálido sub-húmedo con lluvias en verano con precipitación de 800 a 1,100 mm, y temperatura media anual de 22 a 29°C y de 5 a 6 meses secos. Ocupa una superficie de 217,300 ha. Las principales especies que caracterizan esta comunidad son: huje (*Brosimum alicastrum*), primavera (*Cybistax donnell-smithii*), cayaco (*Orbignya guacuyule*), chico zapote (*Achras zapota*), parota (*Enterolobium cyclocarpum*), rosa morada (*Tabebuia rosea*) y cedro rojo (*Cedrella mexicana*).

Selva mediana subcaducifolia. Se localiza en la zona costera, en las estribaciones de la sierra hacia el mar y cañadas húmedas de la zona de "tierra caliente" del estado. Se encuentra entre los 200 y 1,100 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano con precipitación anual de 800 a 1,100 mm, temperatura media anual de 23 a 27°C y 6 a 7 meses secos al año. Abarca una superficie de 380 200 ha. Las principales especies son: rosa morada (*Tabebuia rosea*), parota (*Enterolobium cyclocarpum*), primavera (*Rosedoendron Donnell-Smithii*), ceiba (*Ceiba pentandra*) y palo culebro (*Astronium graveolens*).

Palmares. Se localizan en la zona costera, a excepción de un área pequeña en el centro del estado. Se encuentra de 0 a 1,000 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano Awo, con 1,000 mm de precipitación y temperatura media anual de 26°C y de 6 a 7 meses secos. Abarcan una superficie de 10,600 ha. Las especies características son palma (*Sabal pumos*) y palma cayaco (*Orbignya guacuyule*).

Sabana. Ocasionado por la acción del hombre, este tipo de vegetación se establece después de la tala, mediante el uso repetitivo del fuego, lo que modifica las características del suelo y se establecen poblaciones de herbáceas, especialmente gramíneas y otras familias. Abarca una superficie de 1,000 ha. La altitud varía de 800 a 850 m. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano Awo, con precipitación de 1,000 mm al año y temperatura media anual de 26°C. Las principales especies son: cirián (*Crescentia alata*) y pinzán (*Pithecellobium dulce*).

Selva baja caducifolia. Está ampliamente distribuido en el estado, en las regiones de tierra caliente y del bajío. Se localiza de 300 a 1,900 metros sobre el nivel del mar. Los climas son seco cálido BS₀(h') y BS₁(h'), cálido subhúmedo con lluvias en verano con precipitación de 500 a 1,100 mm al año, temperatura media anual de 18 a 29°C y 6 a 7 meses secos. Abarca una superficie de 1'347,500 ha. Las principales especies son: tepehuaje (*Lysiloma acapulcensis*), guaje (*L. divaricata*), copal (*Bursera excelsa*), cacalosúchil (*Plumeria rubra*),

cazahuate (*Ipomoea arborescens*), mezquite (*Prosopis laevigata*), y palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*).

Selva baja caducifolia espinosa. Se le encuentra principalmente en los municipios del Valle de Apatzingán. La altitud varía de 40 a 800 m. El clima es seco cálido BS₁(h') y cálido subhúmedo con lluvias en verano, con precipitación de 600 a 1,200 mm al año, temperatura media anual de 24 a 26°C y de 6 a 7 meses secos. Abarca una superficie de 160,600 ha. Las principales especies que lo constituyen son: cirián (*Crescentia alata*), cahuinga (*Cercidium praecox*), mezquite (*Prosopis laevigata*), pinzán (*Pithecellobium dulce*), granjeno (*Celtis iguanaea*) y cascalote (*Caesalpinia coriaria*).

Bosque linearifolio. Se localiza en la zona montañosa del Eje Neovolcánico Transversal. La altitud a la que se encuentra es de 2,800 m. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano con precipitación anual de 1,000 a 1,200 mm y temperatura media anual de 16°C, presentándose heladas en los meses de diciembre, enero y febrero y en algunas ocasiones hasta nevadas. Abarca una superficie de 45,000 ha. La principal especie es el oyamel (*Abies religiosa*), pino (*Pinus spp*) y encinos (*Quercus spp*).

Bosque aciculifolio. Se encuentra a todo lo largo de la región montañosa central sobre el Eje Neovolcánico Transversal. Se localiza en altitudes de 1,200 a 3,000 m, con clima templado subhúmedo con lluvias de verano con precipitación anual de 800 a 1,500 mm, época de lluvias en los meses de junio a octubre y temperatura media anual de 11 a 18°C. Abarca una superficie de 964,500 ha. La vegetación esta constituida en forma principal por pino (*Pinus spp*). En forma aislada se encuentran encino roble (*Quercus spp*) madroño (*Arbutus xalapensis*) y tejocote (*Crataegus pubescens*).

Bosque aciculiesclerofilo. Se localiza en la región montañosa del Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur. En altitudes de 1,000 a 2,700 m en climas templados húmedos y subhúmedos con lluvias en verano C(w₀), C(w₁) y C(w₂), con precipitación anual entre 600 y 1,500 mm y temperatura media anual de 12 a 20°C. Abarca una superficie de 872,800 ha.

Los elementos arbóreos que lo componen son los siguientes: pino (*Pinus spp*) y encino (*Quercus spp*).

Bosque esclerófilo caducifolio. Se localiza en gran parte del estado sobre los dos macizos montañosos, entre los 800 a 2,000 m sobre el nivel del mar.

El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano C(w₁) y C(w₂), y semicálido subhúmedo con precipitación de 800 a 1,200 mm por año, 6 a 7 meses secos y temperatura media anual de 16 a 20°C. Abarca una superficie de 1'206,500 ha. Las principales especies son diferentes especies de encino (*Quercus spp*).

Bosque caducifolio espinoso. Se localiza en el norte del estado, en la región del bajío, entre los 1,300 a 1,900 m de altitud. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano C(w₀), C(w₁) y semicálido subhúmedo con precipitación de 700 a 1,000 mm al año, 6 a 7 meses secos y temperatura media anual de 16 a 20°C. Abarca una superficie de 191,500 ha. Su vegetación está constituida por los siguientes elementos arbóreos: mezquite (*Prosopis laevigata*) y pinzán (*Pithecellobium dulce*).

Matorral alto espinoso crasicaulescente. Se localiza principalmente en la parte más cálida de Tierra Caliente, a lo largo de la ribera del Río Balsas, en altitudes que van de 200 a 400 m. El clima es el seco cálido con precipitación de 700 mm, y temperatura media anual de 26°C y 6 a 7 meses secos. Abarca una superficie de 142,500 ha. Las principales especies son: pitayo (*Lemaireocereus weberi*), nopal (*Opuntia sp*), cazahuatl (*Caesalpinia sp*), cahuinga (*Cercidum praecox*) y mezquite (*Prosopis laevigata*).

Pastizal inducido. Este tipo de vegetación también tiene su origen por la intervención humana. Resulta del desmonte de la vegetación nativa y a través de su recuperación presenta diversas poblaciones vegetales de gran interés para la apicultura, comenzando con las comunidades herbáceas y arbustivas y si su recuperación total se logra, se restablece el tipo de vegetación original desmontado. Puede encontrarse en cualquier parte del estado, en cualquier tipo de vegetación y por consiguiente en cualquier tipo de clima. Abarca una

superficie de 20,450 ha. Generalmente está formado por especies de la familia Gramineae, pero abundan especies herbáceas, sobre todo cuando a estos tipos de vegetación se les da un mal manejo. Además puede encontrarse en su interior especies arbóreas y arbustivas cuyos géneros dependen de las características del tipo de vegetación que le da origen (Figura 1.2).

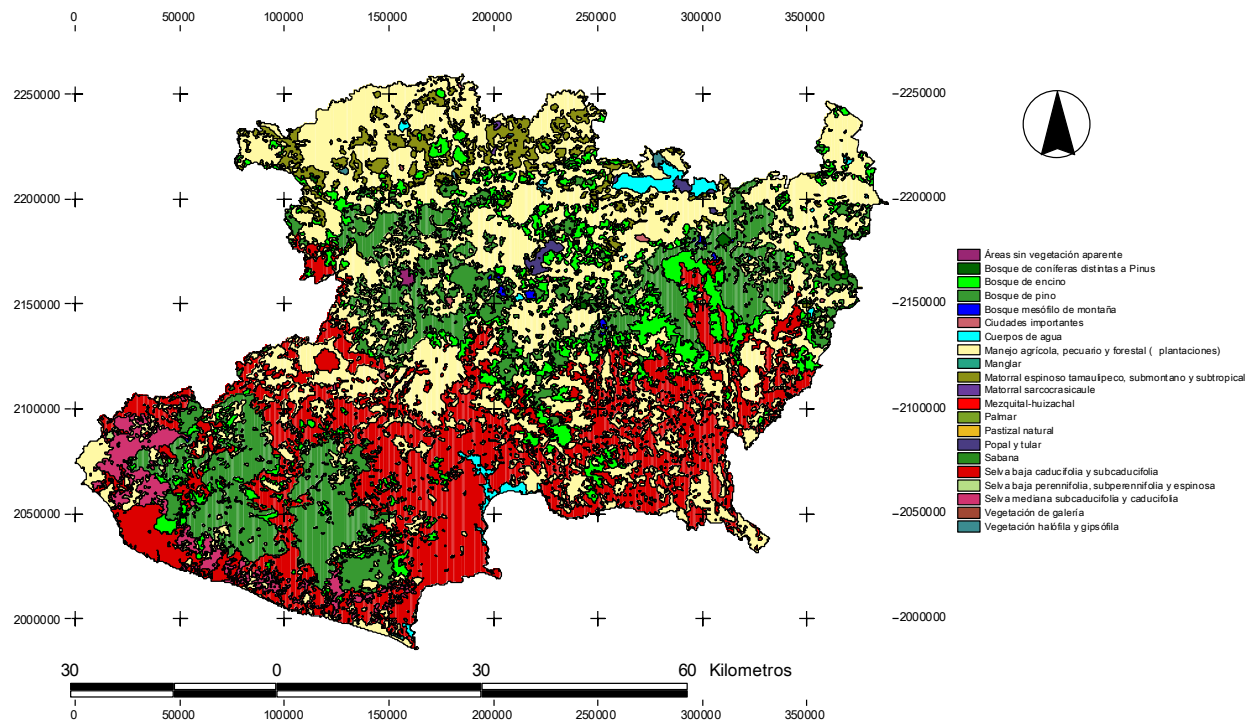


Figura 1.2 Vegetación del Estado de Michoacán según la CONABIO (1998).

Suelos. El Estado de Michoacán presenta una gran variedad de suelos. Destacan por su importancia el vertisol, que cubre una superficie de 18.7% estatal. Este suelo se caracterizan por las grietas anchas y profundas que presentan en época de sequía, son suelos arcillosos, y pegajosos cuando están húmedos, y muy duros cuando están secos. Su utilización agrícola es muy extensa, variada y productiva, son generalmente muy fértiles, pero presentan problemas en su manejo debido a su dureza, y con frecuencia

ocasionan problemas de inundación y drenaje. El luvisol representa el 15.2% y se caracteriza por tener acumulación de arcilla en el horizonte b.

El litosol se distinguen por tener una profundidad menor a los 10 cm. Se localizan en las sierras, en laderas, barrancas y malpais, así como en lomeríos y algunos terrenos planos. Tiene características muy variables, pues pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona en donde se encuentren, de la topografía y del mismo suelo. Estos tienen una superficie de 843,655 ha y representan el 14% de la superficie (CONABIO, 1998).

El andosol es un suelo derivado de cenizas volcánicas, profundos y bien drenados. Tienen una superficie de 843 655 ha que representa el 14% de la superficie del Estado.

El regosol es un suelo de textura media predominando la pedregosidad, su espesor es mayor de 10 cm. En general son de tonos claros. Se encuentran en las playas, dunas y, en mayor o menor grado, en las laderas de las sierras, muchas veces acompañados de litosoles y de roca o tepetate. Su fertilidad es variable, y su uso agrícola está condicionado principalmente a su profundidad y a la pedregosidad que presenten. Este tipo de suelo tiene una superficie de 784,575 ha y cubre una superficie estatal del 15%.

El principal distintivo de los feozem es una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes. Son suelos abundantes en nuestro país, y los usos son variados, en función del clima, relieve y algunas condiciones del suelo. Muchos feozem son profundos y están situados en terrenos planos, que se utilizan para agricultura de riego o de temporal, con altos rendimientos. Los menos profundos, o los que se presentan en laderas y pendientes, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con mucha facilidad. Se pueden utilizar para ganadería. Tiene una superficie de 707,896 ha que significa el 12% del total estatal (Figura 1.3).

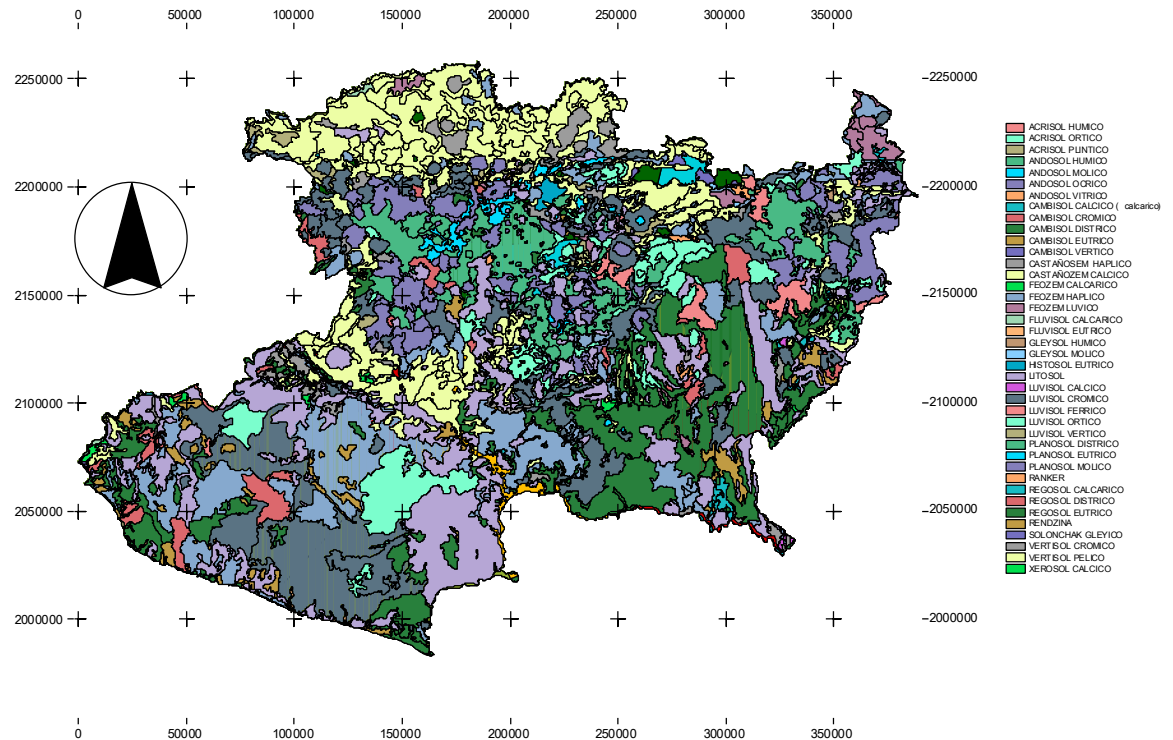


Figura 1.3 Los Suelos del Estado de Michoacán, México.

Selección de las estaciones climáticas utilizadas En el Estado de Michoacán existen 227 estaciones climatológicas, dentro de las cuales todas tienen pluviómetros. La selección se hizo sobre la base al número de años con registros continuos, de las cuales 72 estaciones cuentan con los registros de más de 25 años necesarios para el análisis estadístico (Figura 1.4).

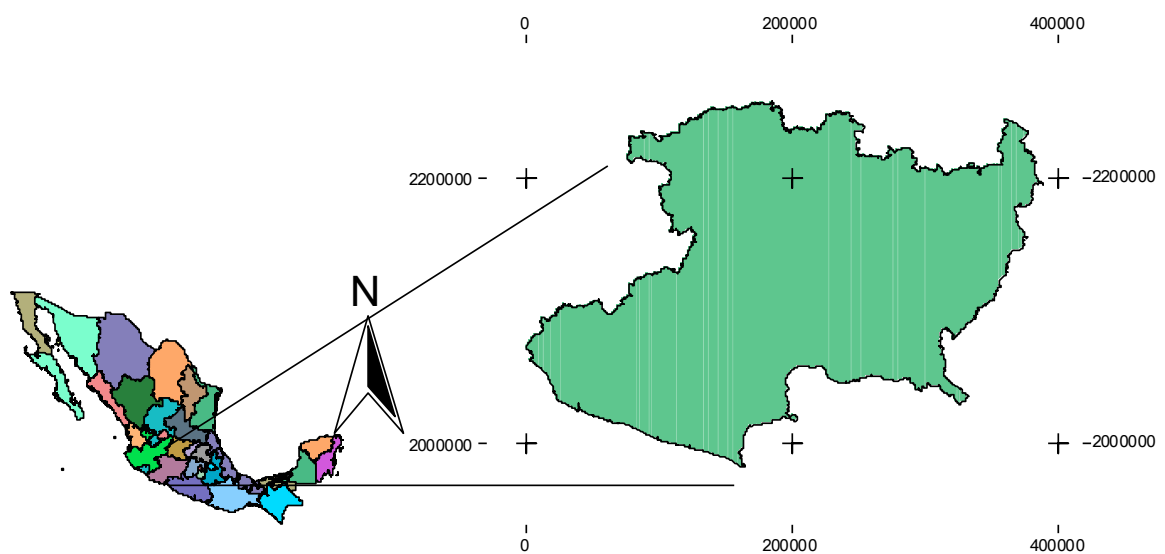


Figura 1.4 Estaciones climatológicas utilizadas en el análisis.

En la selección se tomó como criterio la cantidad y periodicidad de datos, analizándose estaciones con observaciones de mas de 25 años. Las observaciones de precipitación diaria abarcan desde el año de 1940 hasta 1998, variando el número de años para cada estación. Las estaciones climáticas presentan altitudes que van de 300 hasta 2525 m.s.n.m y precipitaciones medias entre 633 mm (Nueva Italia) y 1523 mm (Uruapan, CFE).

Estimación de la probabilidad de ocurrencia de lluvia. Para la estimación de las lluvias con las probabilidades de ocurrencia de 20, 50 y 80% se utilizó la distribución probabilística gamma [1]. La probabilidad de ocurrencia de una lluvia se define matemáticamente como $P_x(x) = P_{x \leq X}$. Es decir, es la probabilidad de que ocurra la variable X con una cantidad igual o menor que x . Por el contrario, la probabilidad de excedencia se estima como $P_x(x) = 1 - (P_{x \leq X})$. Es decir, es la probabilidad de que se exceda la variable X en una cantidad x .

La precipitación es difícil de predecirse y por tal motivo se utilizan modelos probabilísticos en las proyecciones. Para este caso se utilizó la distribución gamma. Esta distribución probabilística ha sido utilizada ampliamente en hidrología, y se ha utilizado para estimar la probabilidad de duración de precipitaciones diarias, semanas, meses y años (Barger and Tom, 1949 en Haan, 1986). Los caudales en diversas escalas temporales han sido también descritos por esta función.

A partir de datos de precipitación mensual de 72 estaciones del Estado de Michoacán se calcularon las probabilidades de lluvias mensuales y anuales utilizando la distribución gamma [1], donde la función de densidad es dada por:

$$p_x(x) = \lambda^\eta x^{\eta-1} e^{-\lambda x} / \Gamma(\eta) \quad x, \lambda, \eta > 0. \quad [1]$$

$\Gamma(\eta)$ es la función gamma y tiene las siguientes propiedades

$$\Gamma(n) = (n-1)! \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\Gamma(n+1) = n\Gamma(n) \text{ para } n > 0$$

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} t^{n-1} e^{-t} dt \text{ para } n > 0$$

$$\Gamma(1) = \Gamma(2) = 1; \Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$$

Se utilizó el método de máxima verosimilitud (Procedimiento de Greenwood y Durand, 1975) en la estimación de parámetros con un factor de corrección (FC).

$$y = \ln \bar{x} - \overline{\ln x} = 0.072$$

$$\eta = (.500876 + .1648852y - .0544274y^2) / y$$

$$FC = 3n / n$$

$$\hat{\lambda} = \hat{n} / \bar{x} = 7.107 / 14.65 = 0.485$$

donde \ln = logaritmo natural, x es la variable aleatoria o precipitación mensual, λ y η son los parámetros lambda y eta, de forma y escala de la distribución de precipitaciones mensuales.

Se estimaron los parámetros eta y lambda para cada una de las estaciones utilizando datos de precipitación de por lo menos 25 años. Se calcularon las precipitaciones con posibilidad de presencia de 20%, 50% y 80% de la precipitación media de cada mes del año. Se elaboraron mapas de cantidad de lluvias para agosto, que es un mes importante en la recarga de acuíferos en la zona.

Curvas de intensidad-duración-frecuencia. Se calcularon las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para los datos de precipitación diaria de las 72 estaciones, utilizando la distribución de valores extremos de Gumbel (TRAGSA, 1998). [2]

La función de distribución de probabilidad de Valor Extremo Tipo I es:

$$F(q) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{X-u}{\alpha} \right) \right] - \infty \leq X \leq \infty \quad [2]$$

Los parámetros u y α se estiman en función de los valores de la muestra

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} Sx \quad Sx = \text{Desviación estándar de la}$$

muestra

$$u = m_x - 0.5772\alpha \quad m_x = \text{Media de la muestra}$$

La función de densidad de probabilidad de EVI, viene dada por:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \frac{1}{\alpha} \exp \left[- \frac{x-u}{\alpha} - \exp \left(- \frac{x-u}{\alpha} \right) \right] - \infty \leq X \leq \infty$$

Una variable reducida puede definirse como:

$$y = \frac{x-u}{\alpha}$$

Sustituyendo la expresión de la variable reducida en la expresión de la función de distribución;

$$F(x) = \exp[-\exp(\gamma)]$$

Resolviendo para γ

$$y = -Ln \left[Ln \left(- \frac{1}{F(x)} \right) \right]$$

Como se demostró para un determinado periodo de retorno T y definido un evento extremo $x \geq x_t$:

$$P(x \geq x_t) = 1 - P(x < x_t) = 1 - F(x_t)$$

Despejando el valor de la función de distribución de probabilidad:

$$F(x_t) = \frac{T-1}{T}$$

Sustituyendo en el valor de la variable reducida:

$$y_t = -Ln \left[Ln \left(-\frac{T}{T-1} \right) \right]$$

Si despejamos de la ecuación de la variable reducida el valor de x_t :

$$x_t = u + \alpha y_t \frac{T-1}{T}$$

El valor así calculado de x_t nos definiría la magnitud de dicha variable para un periodo de retorno T.

Estimación de probabilidades de flujos de corrientes: Se estimaron probabilidades de escurrimiento de 20, 50 y 80% para las estaciones que cumplan los supuestos de registros más amplios y que provengan de ríos y corrientes que no tengan regulación. Se ajustó la distribución Log Normal, descrita por logaritmos naturales de la variable aleatoria que se distribuye normalmente (Aparicio, 2005), es expresada como una función de densidad probabilística por el modelo [3]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta} \right)^2} \quad [3]$$

Donde los valores de α y β se estiman a partir de n observaciones x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ como:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \quad \beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{1/2}$$

Evapotranspiración. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizaron los datos de temperatura mínima y máxima de las estaciones climatológicas del estado. Se utilizó la formula propuesta por Thornthwaite [3], la cual no presenta corrección para los diferentes tipos de vegetación. Es

necesario hacer un ajuste para el número de días por mes y la duración del día, que esta en función de la latitud.

La formula empírica desarrollada por Thornthwaite es:

$$Et = 1.6 \left[\frac{10T_a}{I} \right]^a$$

[3]

donde:

Et = Evapotranspiración potencial en cm

T_a = Temperatura media mensual del aire (C)

$$I = \text{Índice calórico anual} = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T_{ai}}{5} \right]^{1.5}$$

$$a = 0.49 + 0.0179 I - 0.0000771 I^2 + 0.000000675 I^3$$

Precipitación. Se estimó la precipitación anual de cada estación utilizando el método de Polígonos de Thiessen, Isoyetas y precipitación promedio aritmético.

Polígonos de Thiessen. Este método envuelve un factor de peso que es proporcional a la fracción del área total que es representada por cada estación. Las estaciones vecinas son unidas por líneas punteadas, y después se trazan bisectrices perpendiculares que se unen para formar un polígono alrededor de cada estación meteorológica (Dunne and Leopold, 1947).

El área del polígono se determina, y el área de influencia se calcula usando [4]:

$$Wi = Ap/A \quad [4]$$

Donde:

Wi = Área de influencia de la estación

Ap = Área del polígono dentro de la superficie total

A = Área total (Km²)

Promedio aritmético. El método de precipitación promedio aritmético usa solo aquellas estaciones que se encuentran dentro del polígono a calcular y se calcula usando [5]:

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

[5]

donde:

\bar{P} = Lámina media de precipitación (mm)

P_i = Precipitación de la estación dentro del polígono

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

OCURRENCIA DE LA PRECIPITACIÓN. Los parámetros de forma y escala de la distribución gamma para la precipitación mensual del mes de agosto se reportan en las figuras 1.5 y 1.6 siguientes. Los parámetros para el resto de los meses se presentan en los anexos (Figura 1.5 y 1.6).

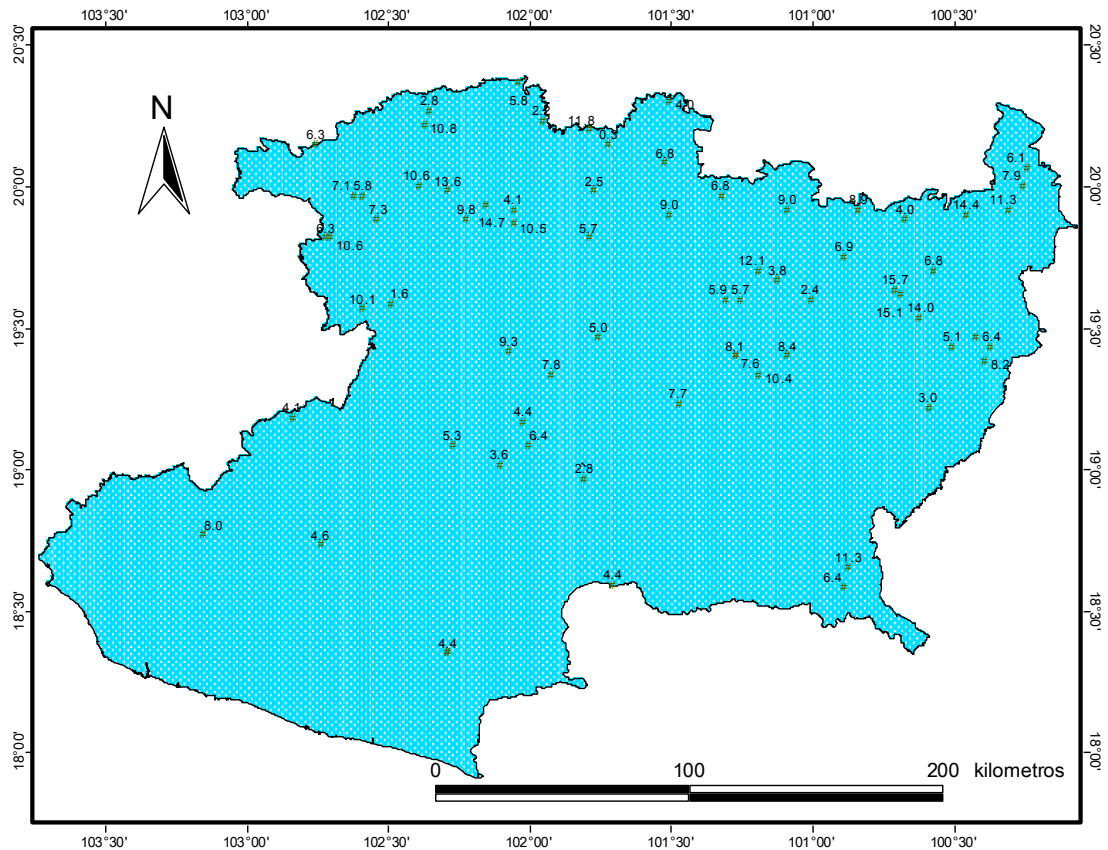


Figura 1.5 Parámetro de forma (η) de la distribución gamma para lluvias mensuales de agosto en las estaciones analizadas en Michoacán.

Precipitación estimada con la distribución gamma. En la Figura 1.6 se puede observar que es posible agrupar áreas que tienen similitudes en el parámetro η , pero que no siguen un patrón de distribución claro. Se explica posiblemente porque las estaciones son pocas y solo se tomaron en cuenta estaciones con mas de 25 años de registros.

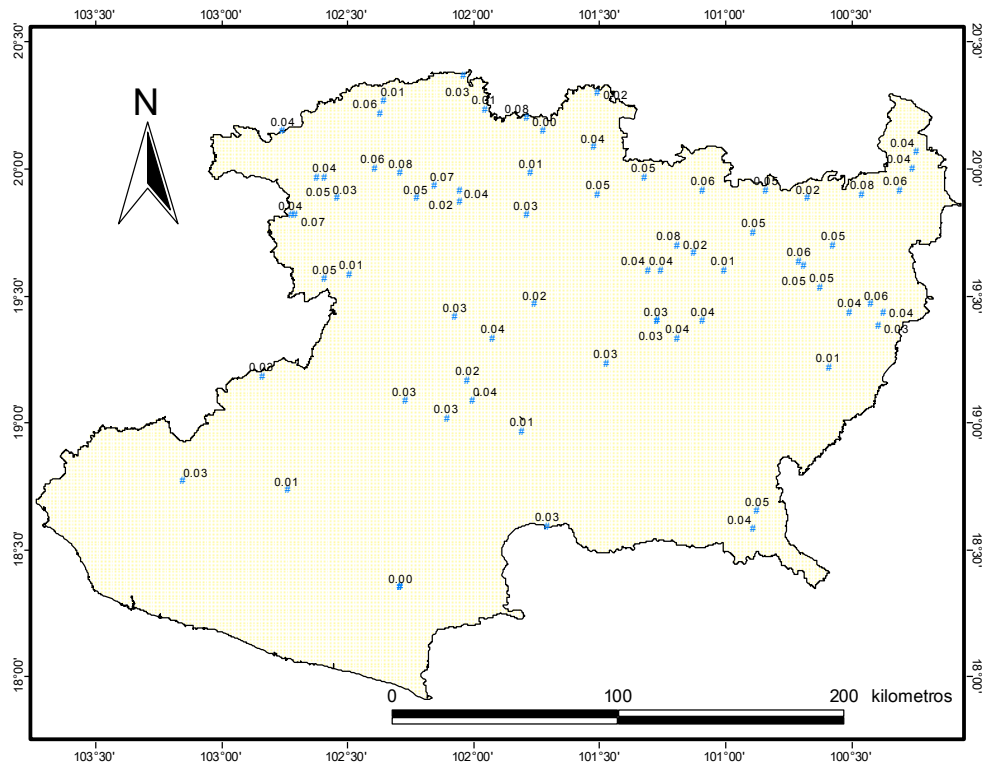


Figura 1.6 Parámetro de escala (λ) de la distribución gamma para lluvias mensuales de agosto en las estaciones analizadas en Michoacán.

La precipitación mensual de agosto con una probabilidad de presencia del 20% se presenta en la Figura 1.7.

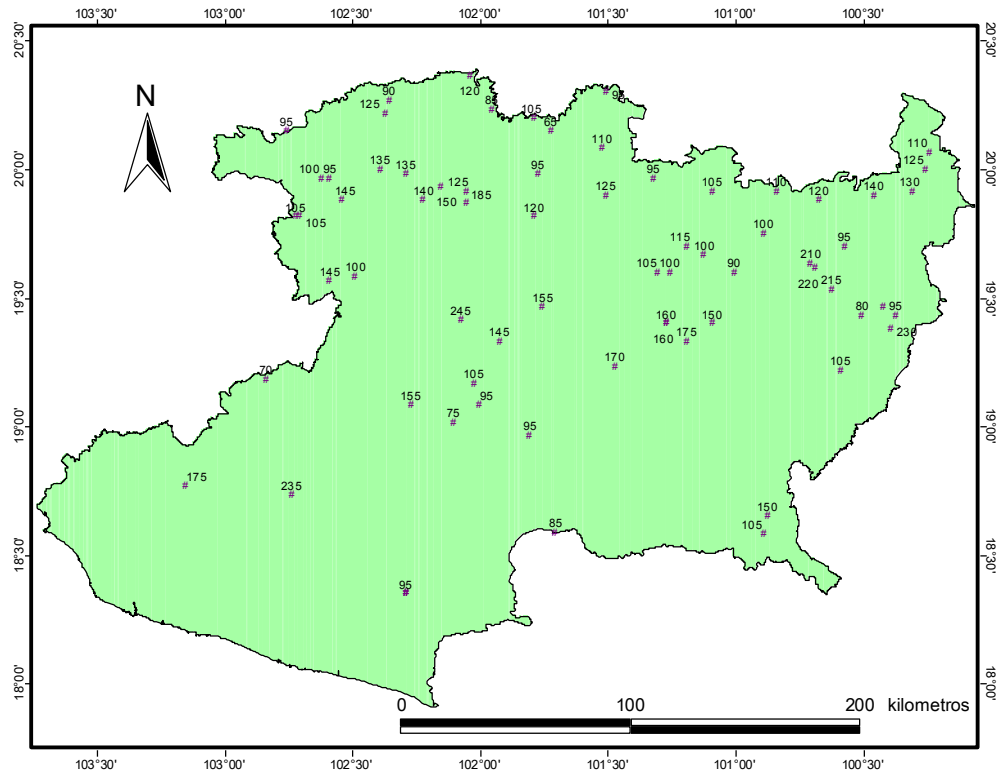


Figura 1.7. Precipitación estimada con la distribución gamma para una probabilidad de ocurrencia de 20%.

La probabilidad de 20% (Figura 1.7) significa que en 4 de cada 5 años se presentaran precipitaciones iguales o mayores a la lluvia estimada para el mes de agosto. Se observa que a medida que se avanza de la costa hacia la Sierra Madre y el Eje Neovolcánico existe un incremento en la precipitación, y a medida que nos acercamos más al norte del estado la precipitación disminuye y la tendencia no es muy clara.

Las probabilidades de que ocurran precipitaciones por debajo del 50% también siguen un patrón similar, y aumentan según la altitud, pero se hace menos notorio este aumento disminuyendo al acercarnos a los límites con el estado de Guanajuato (Figura 1.8).

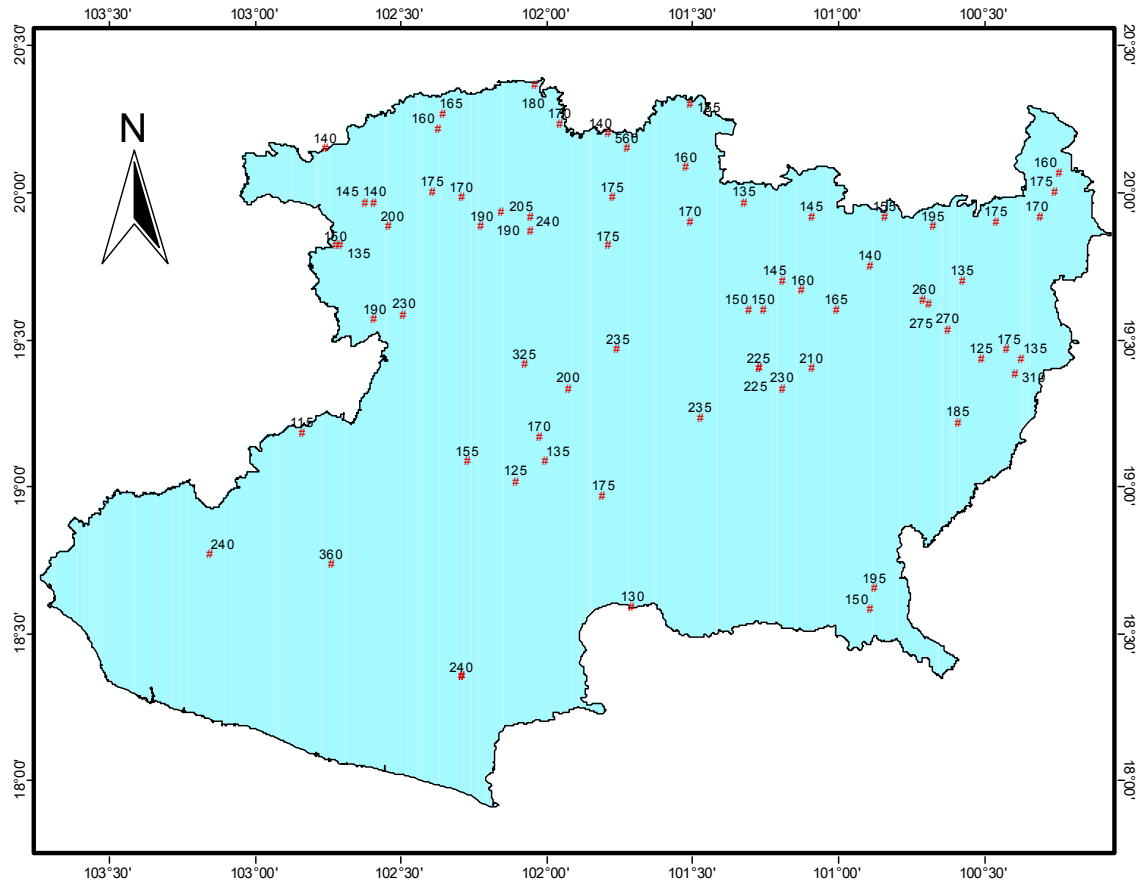


Figura 1.8 Precipitación estimada con la distribución gamma para una probabilidad de ocurrencia de 50%.

Se observa también que la precipitación es baja en algunas estaciones que se encuentran cerca de la costa, pero que aumenta a medida que nos acercamos a las zonas montañosas, hasta alcanzar el máximo en la estación ubicada en la ciudad de Uruapan (830 mm de precipitación) (Figura 1.9).

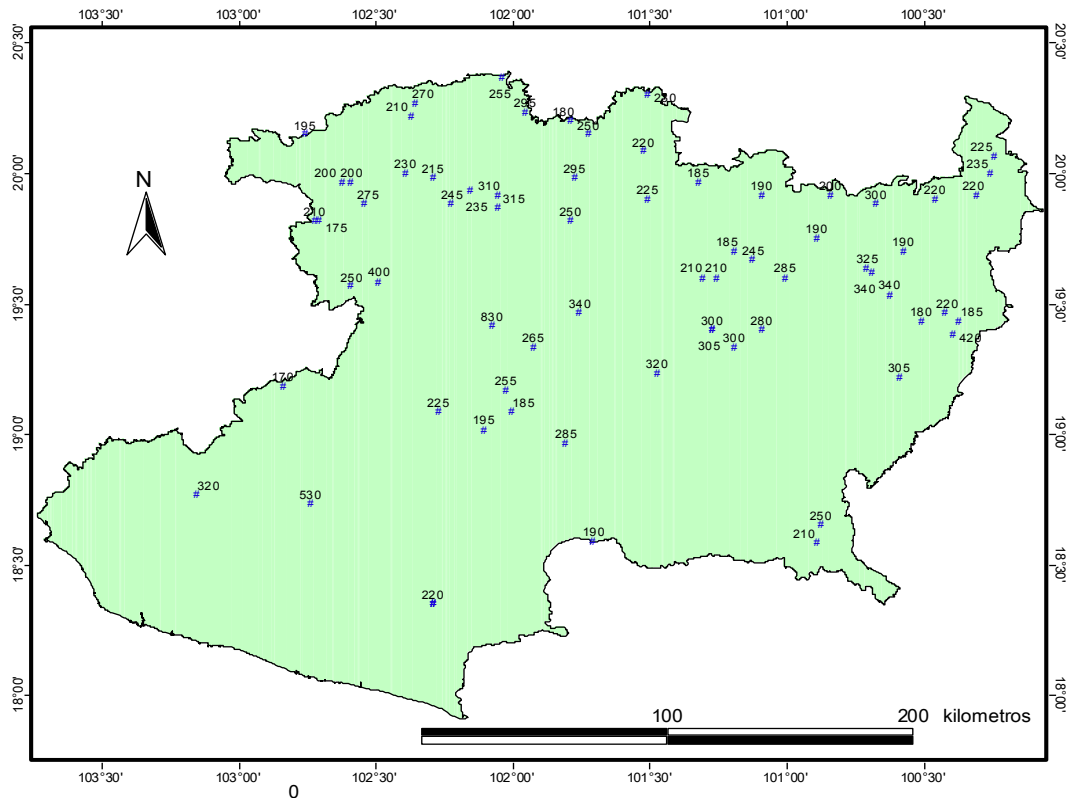
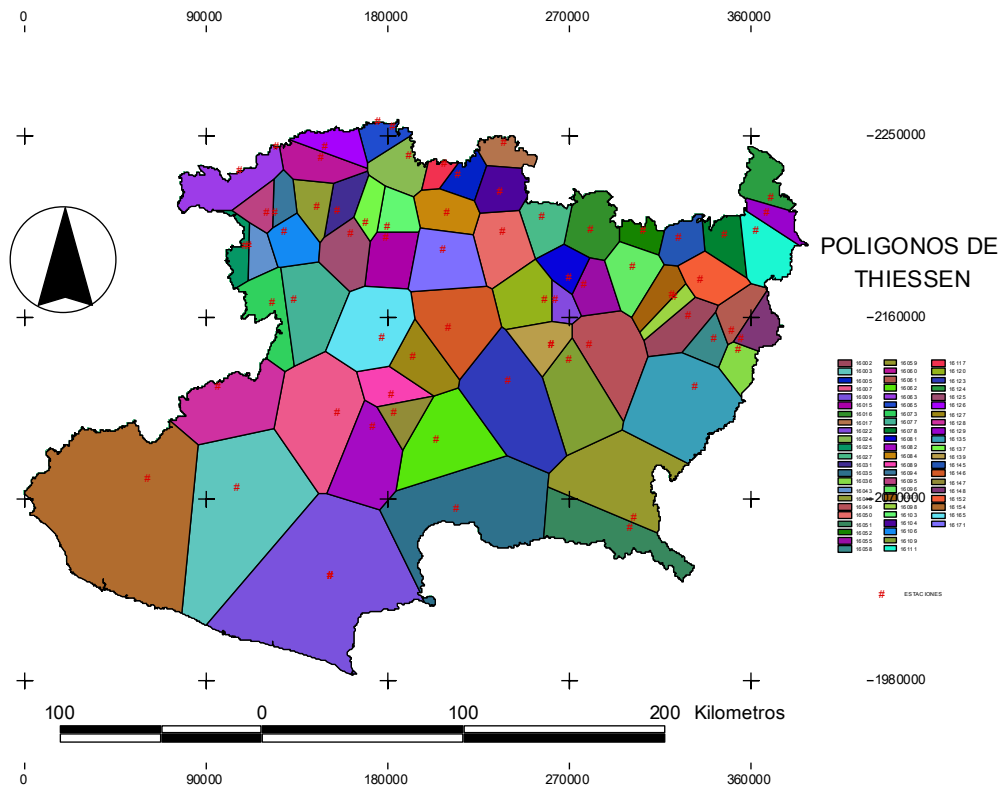


Figura 1.9 Precipitación estimada para el mes de agosto con la distribución gamma para una probabilidad de ocurrencia de 80% para el estado de Michoacán, México.

Calculo de la precipitación por el Método de Thiessen. Las precipitaciones más altas se presentan en las estaciones localizadas en las partes altas del estado como son la Sierra Madre del Sur localizada al suroeste del estado y el Eje Neovolcánico que se ubica del centro occidente al oriente del estado. Las estaciones que presentaron mayor precipitación fueron Los Reyes (16077) con 1377 mm, Uruapan (16165) con 1560 mm y la estación Coalcomán (16154) con 1410 mm. La razón por la que se presentan esta diferencia en precipitación es debido a los efectos de la altitud ya que estas zonas constituyen barreras al paso de las masas de aire húmedo. La precipitación promedio utilizando los polígonos de Thiessen para el Estado es de 975 mm, mientras que calculando la precipitación con el promedio aritmético da un resultado de 917 mm (Figura 1.10).



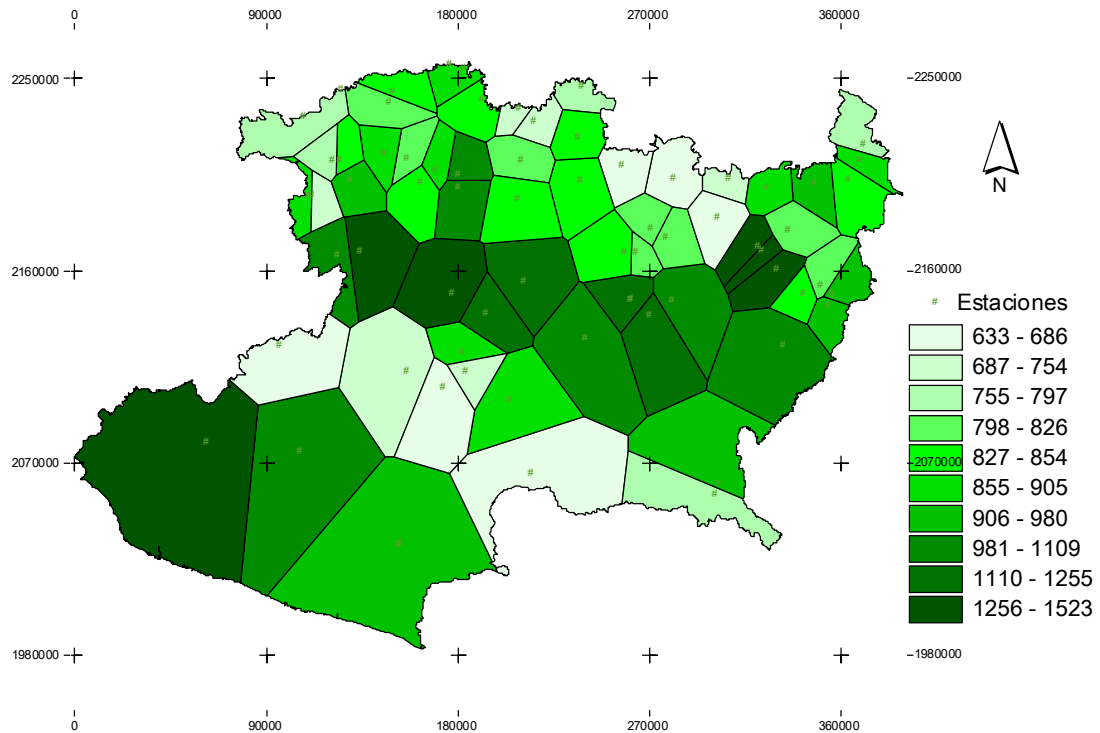


Figura 1.11 Precipitación y su área de influencia estimada por el método de Thiessen para el Estado de Michoacán.

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. Se elaboraron mapas a partir de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia a partir de la distribución de valores extremos y a partir de lluvias máximas en 24 horas.

Los valores mas altos de precipitación se localizan en las estaciones de Uruapan (16155) con 24.4 mm, la estación Cumuato 16150 con 27.2 y la menor lluvia en 1 año para un periodo de retorno de un año se presenta en las estaciones de Morelia (16081) con 4.3 mm, Corrales (16024) con 4.7 mm y Zirahuén (16146) con 5.3 mm. Esto significa que en estas estaciones se esperan precipitaciones de por lo menos estos volúmenes para el periodo de retorno (Figura 1.12).

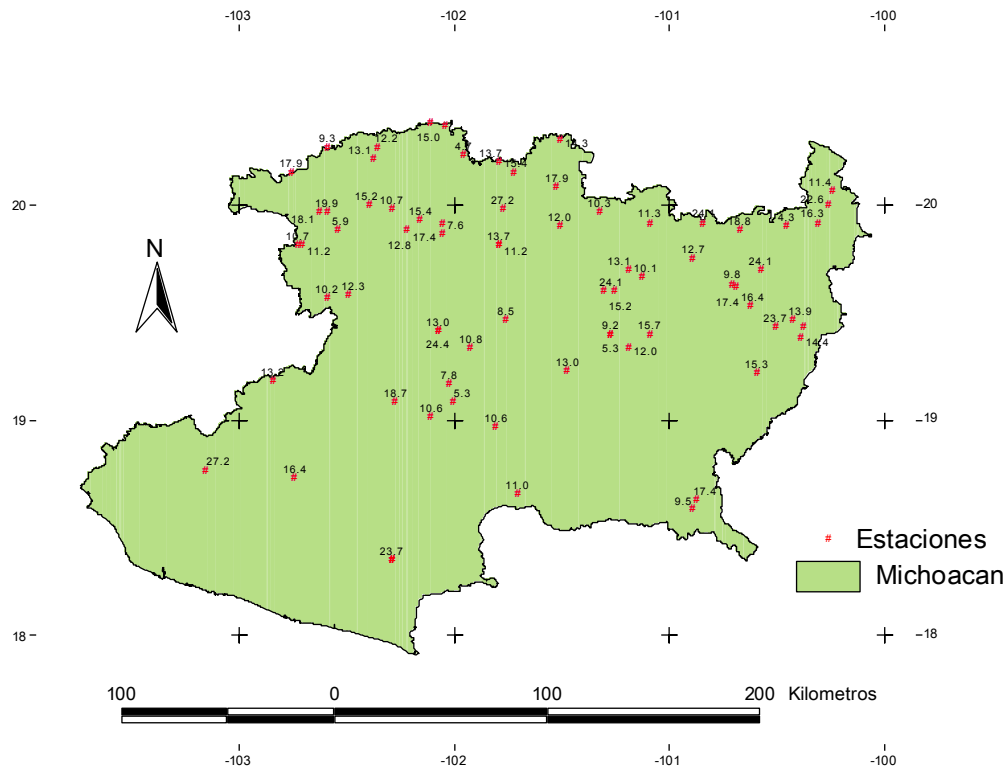


Figura 1.12 Cantidad de la precipitación estimada por la distribución de valores extremos para una duración de 1 hora y una frecuencia de 1 año para las estaciones climáticas del Estado de Michoacán, México.

En cuanto a los valores de precipitación con una duración de una hora y un periodo de retorno de 25 años los valores mas bajos se presentan en las estaciones Cumuato de Briseñas (16030), Jesús del Monte, Morelia (16055) y Zinapecuaro (16052) con 12.1, 21.7 y 25.3 mm respectivamente, mientras que los valores mas altos se presentan en la estación Arteaga (16009), Morelia (16081) y Los Reyes (16077) con 118.4, 158.7 y 192.1 mm respectivamente. Esto significa que de acuerdo a los registros 25 años o mas se espera por lo menos una precipitación de 192.1 mm con una duración de una hora en un periodo de 100 años (Figura 1.13).

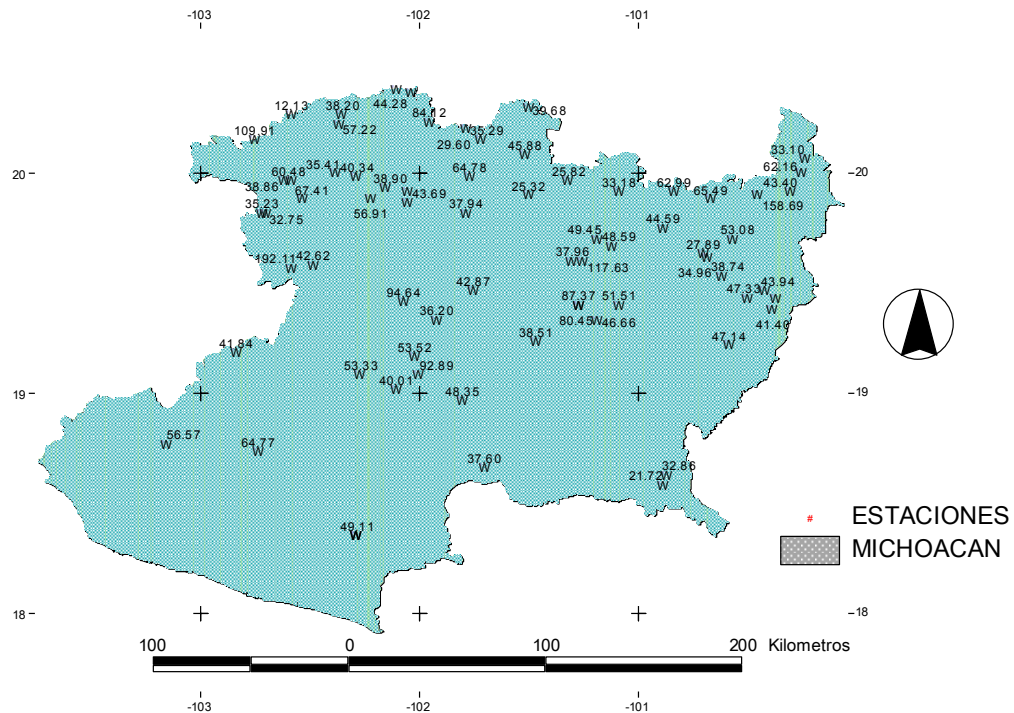


Figura 1.13 Cantidad de precipitación estimada por la distribución de valores extremos para una duración de 1 hora y una frecuencia de 25 años para las estaciones climáticas del estado de Michoacán, México.

Las estaciones Cumuato (16030), Morelia (16055) y Zinapecuaro (16052) presentan valores de 13.1, 25.9 y 29.9 mm para una duración de una hora y una frecuencia de 100 años. Las estaciones mas altas son Cointzio (16022), Morelia (16081) y Zinapecuaro (16052) con 166.4, 227 y 270 mm respectivamente de precipitación (Figura 1.14).

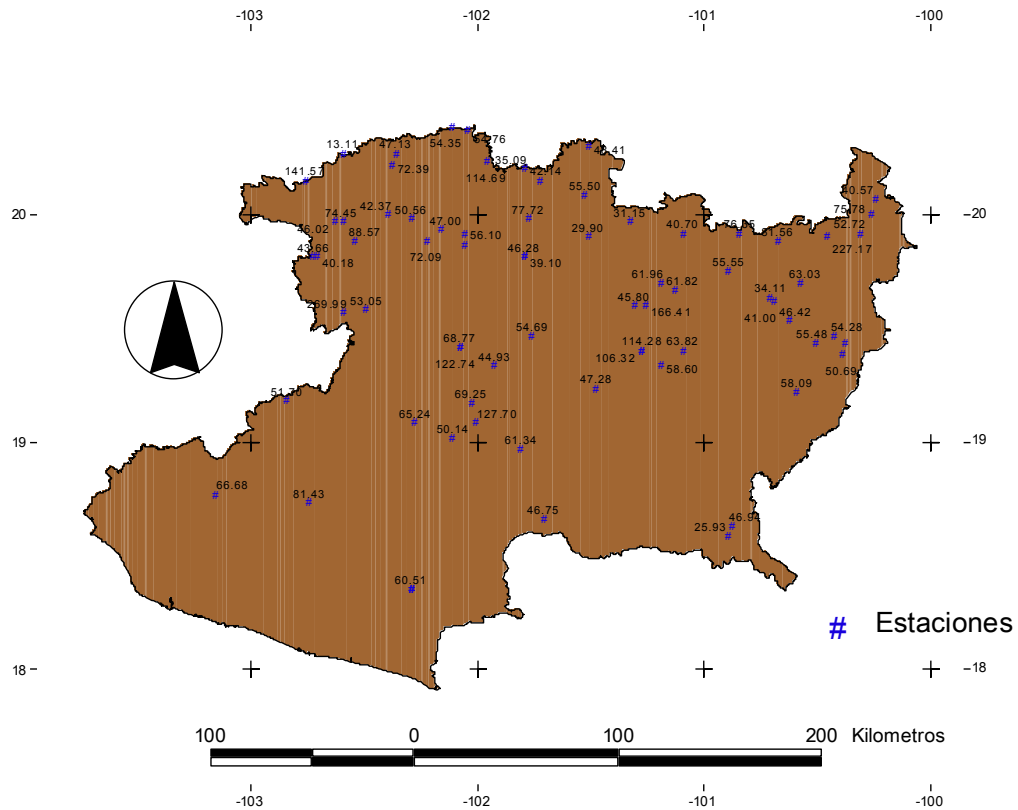


Figura 1.14 Cantidad de precipitación estimada por la distribución de valores extremos para una duración de 1 hora y una frecuencia de 100 años para las estaciones climáticas del Estado de Michoacán, México.

Las precipitación estimada para las estaciones del Estado con una duración de 24 horas y un año de periodo de retorno se presentan en las estaciones Corrales (16024), Tuzantla (16135) y Los Reyes (16077), mientras que las mas altas se presentan en la estación Uruapan (16165), Briseñas (16150) y Cumuato (16085) con 53.04, 59 y 59 mm. respectivamente (Figura 1.15).

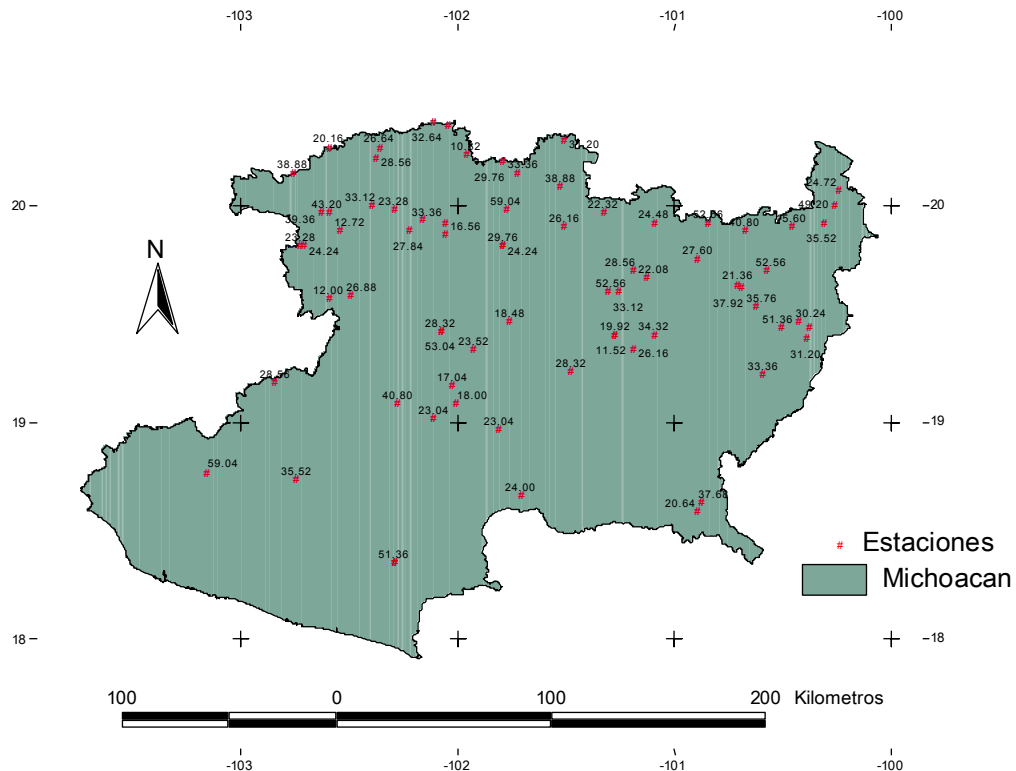


Figura 1.15 Intensidad de la precipitación estimada por la distribución de valores extremos para una duración de 24 horas y una frecuencia de 1 año para las estaciones climáticas del Estado de Michoacán, México.

Las estaciones que presentan menores volúmenes de precipitación para una duración de 24 horas y una frecuencia de 10 años son la Cumuato (16030), Jesús del Monte (16055) y la de Cuitzeo (16027) con 25, 41 y 48.2 mm respectivamente, mientras que las mas altas son la Arteaga (16009) con 209.3, Morelia (16081) con 244.3 y Los Reyes (16077) con 303 mm (Figura 1.16).

Las lluvias intensas de 24 horas y con periodo de retorno de 100 años presenta sus valores mas bajos para las estaciones Cumuato (16030), Jesús del Monte (16055) y Zinapecuaro (16052) con valores 28.6, 56.4 y 65 mm. Estas estaciones se encuentran ubicadas al norte del estado y reciben menos humedad mientras que las estaciones que tendrán una precipitación alta serán las estaciones Cointzio (16022) con 361.7, Morelia (16081) con 493.9 y 587 mm para Los Reyes (Figura 1.17).

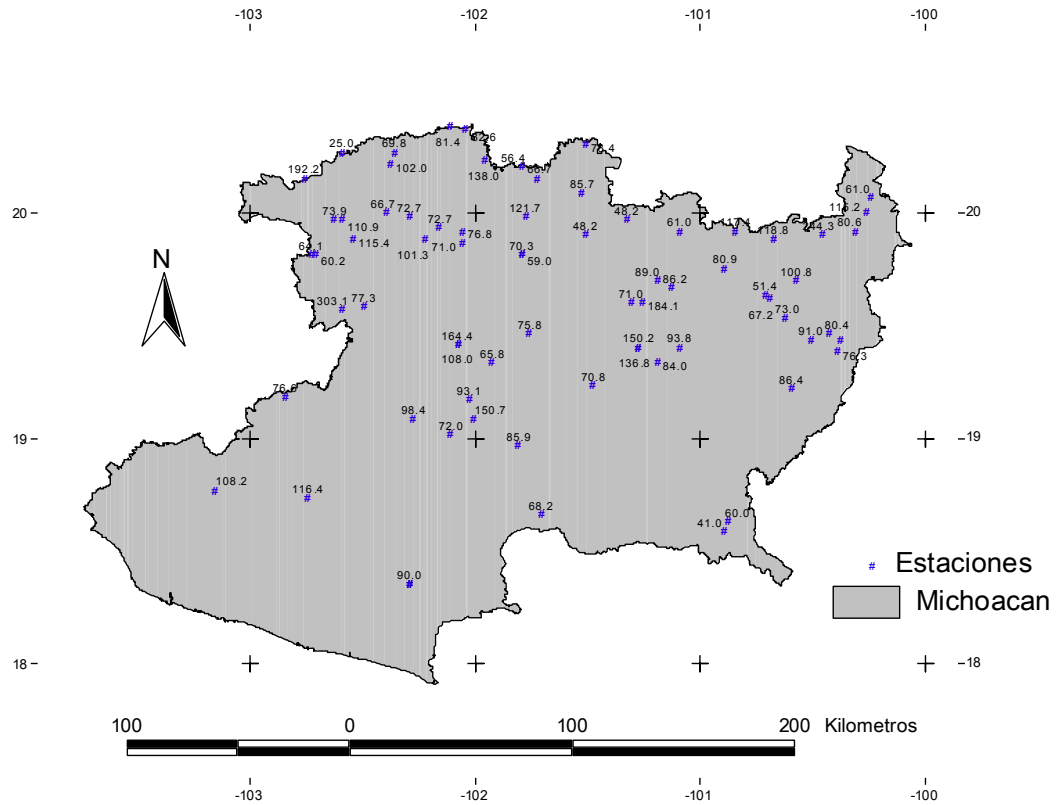


Figura 1.16. Cantidad de precipitación estimada por la distribución de valores extremos para una duración de 24 hora y una frecuencia de 10 años para las estaciones climáticas del estado de Michoacán, México.

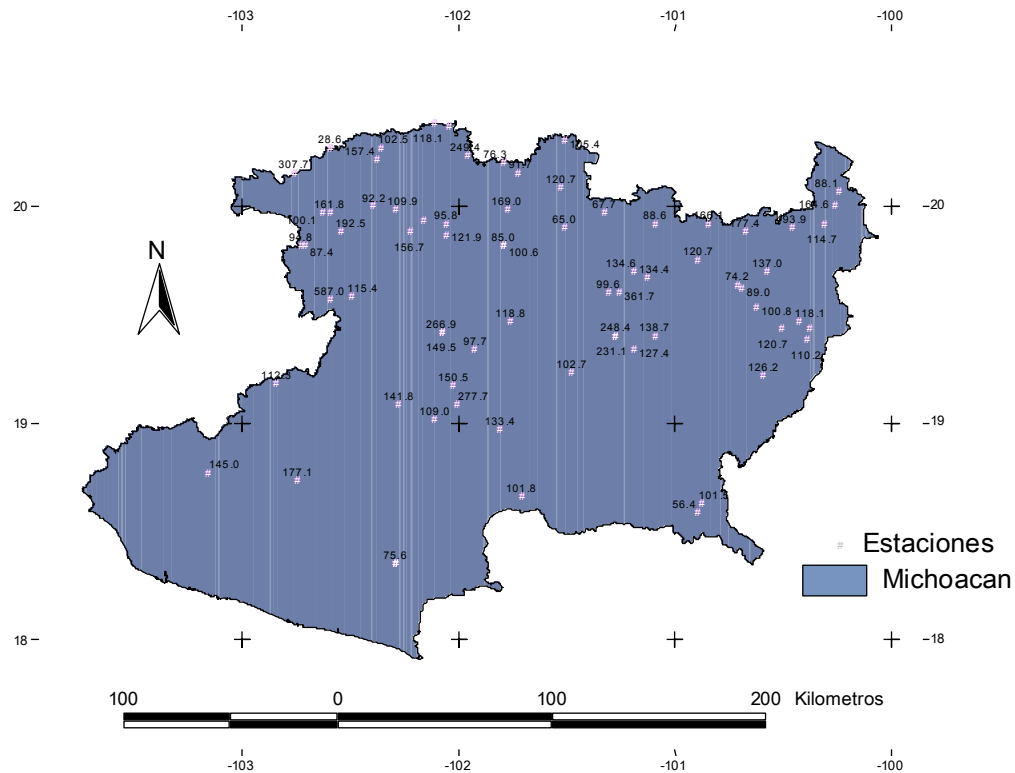


Figura 1.17 Cantidad de precipitación estimada por la distribución de valores extremos para una duración de 24 horas y una frecuencia de 100 años para las estaciones climáticas del Estado de Michoacán, México.

Evapotranspiración. La evapotranspiración tuvo sus valores mas altos en las estaciones que se encuentran entre las depresiones de las sierras. Los valores mas altos se presentan en las estaciones de Tepalcatepec (16128) con 2,402 mm, ya que presenta altas temperaturas durante la mayor parte del año. La estación de Apatzingán (16007) tiene una evapotranspiración potencial de 2,315 mm.

La zona que presenta menores temperaturas y por lo tanto evapotranspiración potencial es la región del noreste del Eje Neovolcánico, donde se encuentra la región de la mariposa monarca. Aquí las estaciones Presa Pucato (16016), Presa Sabaneta (16098) y Agostitlán (16002) del municipio de Cd. Hidalgo presentan las evapotranspiraciones mas bajas, con 674, 678 y 686 mm respetivamente.

El promedio para todas las estaciones del Estado de Michoacán utilizando los polígonos de Thiessen es de 1,254 mm, mientras que la evapotranspiración promedio utilizando la media aritmética es de 1,043 milímetros (Figura 1.18).

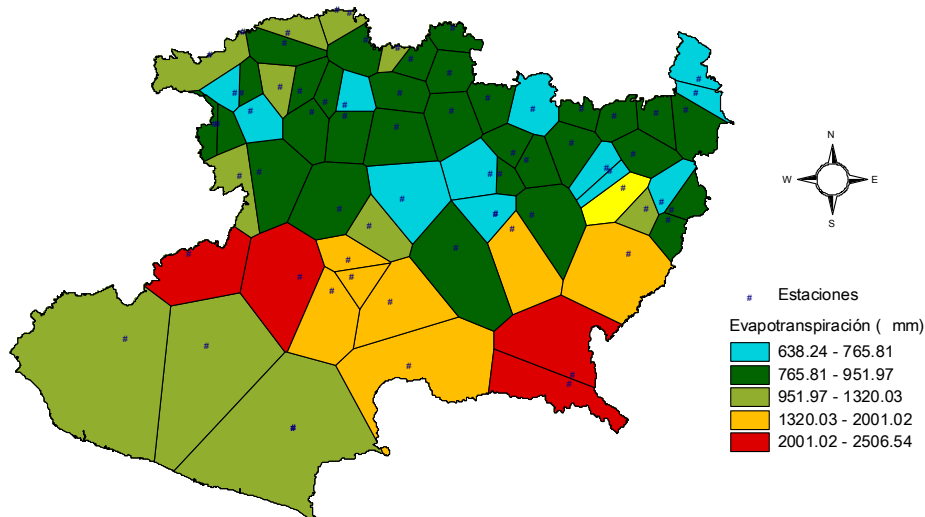


Figura 1.18 Evapotranspiración potencial y el área de influencia estimada por el método de Thiessen para el estado de Michoacán.

La evapotranspiración promedio con la superficie del estado de Michoacán (5,896,400 ha) arroja un volumen potencial de agua bombeado hacia la atmósfera de 73,940 M m³ o de 61,499 M m³ para evapotranspiraciones aerales estimadas por Thiessen o por promedio aritmético, respectivamente.

Cálculo de los caudales totales con diferentes probabilidades. Se encontró que de las estaciones analizadas, La Piedad mostró el mayor caudal promedio durante un lapso de mediciones de 20 años, y este fue de 1,753 millones de m³ anuales con una desviación de 1,116 millones de m³ (Cuadro 1). Se obtuvo un caudal promedio de 178.7 M m³ con una desviación estándar de 122.7 M m³.

Cuadro 1. Los estadísticos de los caudales anuales de los ríos con tres probabilidades de presencia del Estado de Michoacán, México.

ESTACIÓN	AÑOS	FLUJO PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	PROBABILIDAD (%)		
				20	50	80
ANGAMACUTIRO 2	33	222.1	85.0	7.5	17.7	41.3
ANGOSTURA	13	158.8	45.4	21.8	35.9	71.8
ATAPANEO	58	1163.3	234.8	7.1	11.2	17.7
CHIKUITO	59	612.9	131.8	0.1	0.6	3.3
CHORROS	23	554.7	100.0	25.8	40.2	62.1
CORRALES	65	1163.3	953.3	16.2	45.1	127.8
CUPATITZIO	33	320.2	249.1	7.5	17.7	41.3
EL CHARCO	7	45.4	29.4	0.5	1.4	4.3
EL MENTIDERO	14	293.5	213.2	1.1	5.5	27.1
EL PLAN	37	144.6	69.9	1.0	4.3	17.9
EL PUERTO	41	18.8	13.5	0.1	0.5	2.1
EL TAMBOR	66	630.2	258.7	23.9	42.6	74.2
LA ESTANZUELA	52	334.5	73.5	12.8	22.3	38.3
LA PASTORIA	23	828.3	166.7	28.6	52.2	95.5
LA PIEDAD	20	1753.2	1116.7	22.5	64.3	182.4
OBREGÓN	13	52.6	30.2	0.1	0.8	4.9
PIEDRAS BLANCAS	5	953.9	953.3	21.6	47.4	106.9
PIRITÍCUARO	20	8.3	6.1	0.0	0.2	1.6
QUERÉNDARO	29	27.6	14.8	0.5	1.0	2.1
SALIDAS	25	51.7	22.4	0.5	2.1	8.6
SAN ANTONIO	44	744.1	214.1	1.7	3.9	8.9
SAN ISIDRO	38	18.1	6.1	0.5	1.0	2.1
SANTIAGO						
UNDAMEO	46	72.5	22.7	1.7	3.9	8.7
VILLA JIMÉNEZ	18	285.5	71.5	14.7	20.9	29.1
ZIRITZICUARO	20	652.7	144.2	25.0	43.9	74.6
Promedio	32.1	444.4	209.1	9.7	19.5	42.2
Desviación Estándar	18.0	456.0	313.0	10.4	20.5	47.1
Intervalo de Confianza		178.7	122.7	4.1	8.0	18.4

De acuerdo con las estimaciones para el caudal de las estaciones del estado y con una probabilidad del 20% la estación que presenta los caudales mas altos es la de El Tambor con 23.92 millones de metros cúbicos anuales, seguida por La Piedad con 22.47 Mm³. Las estaciones que tienen en el menor caudal anual son Piritícuaro (0.04 Mm³) y Chiquito con 0.09 Mm³ (Figura 1.19).

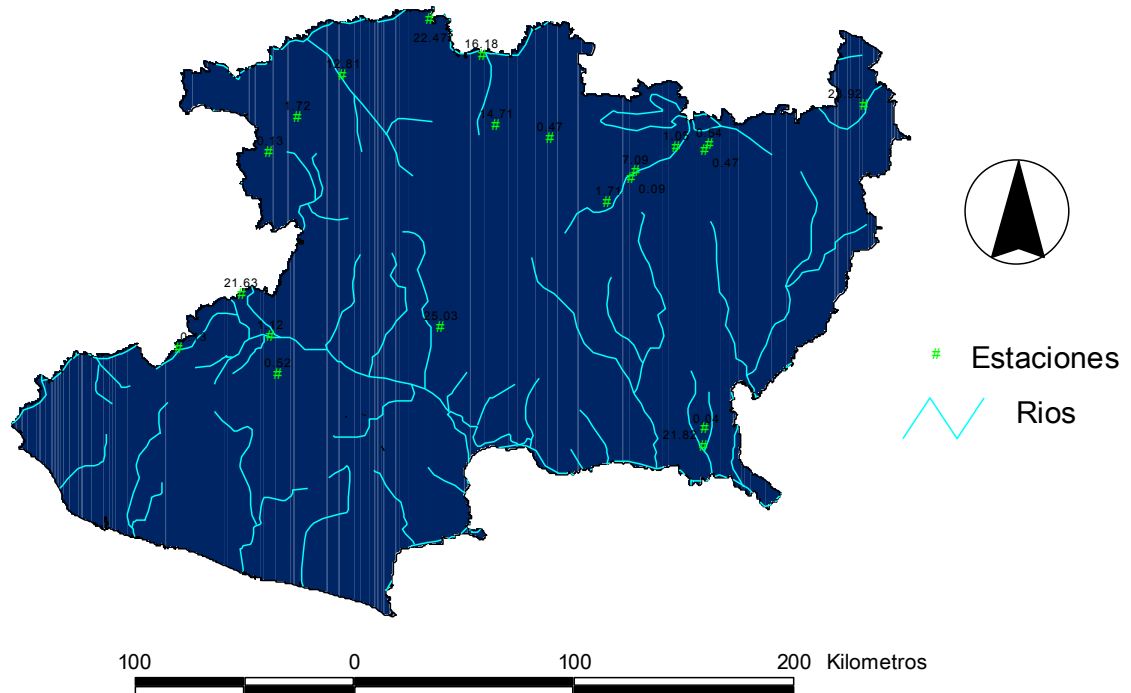


Figura 1.19 El caudal anual estimado con una probabilidad de ocurrencia de 20% para las estaciones hidrométricas del Estado de Michoacán, México.

Para probabilidades de ocurrencia del 50%, las estaciones hidrométricas que muestran menor flujo son Piriticuar con 0.2 Mm^3 y El Puerto con 0.5 Mm^3 anuales mientras que los flujos mas altos se presentan en las estaciones La Piedad y La Pastoría con 64.3 y 52.2 Mm^3 . Esto significa que es probable que de la mitad de un cierto periodo de años se presenten caudales iguales o menores a estos valores por año (Figura 1.20).

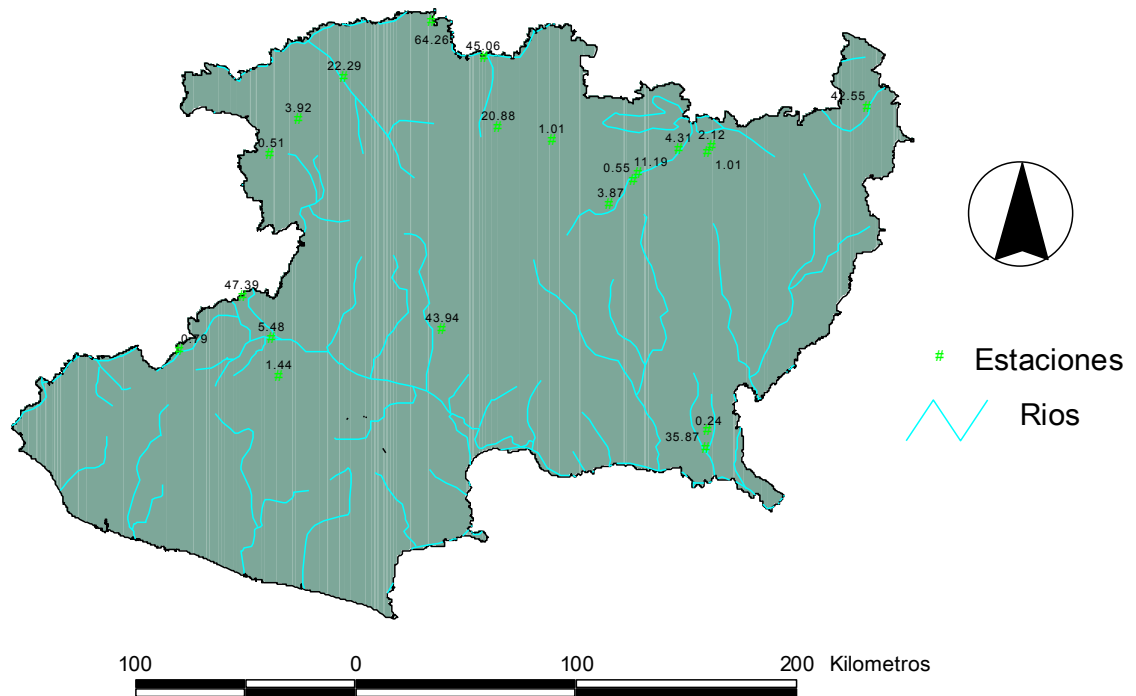


Figura 1.20 El Caudal anual estimado con una probabilidad de ocurrencia de 50% para las estaciones hidrométricas del estado de Michoacán, México.

En cuanto a la estimación de caudales del 80% del promedio

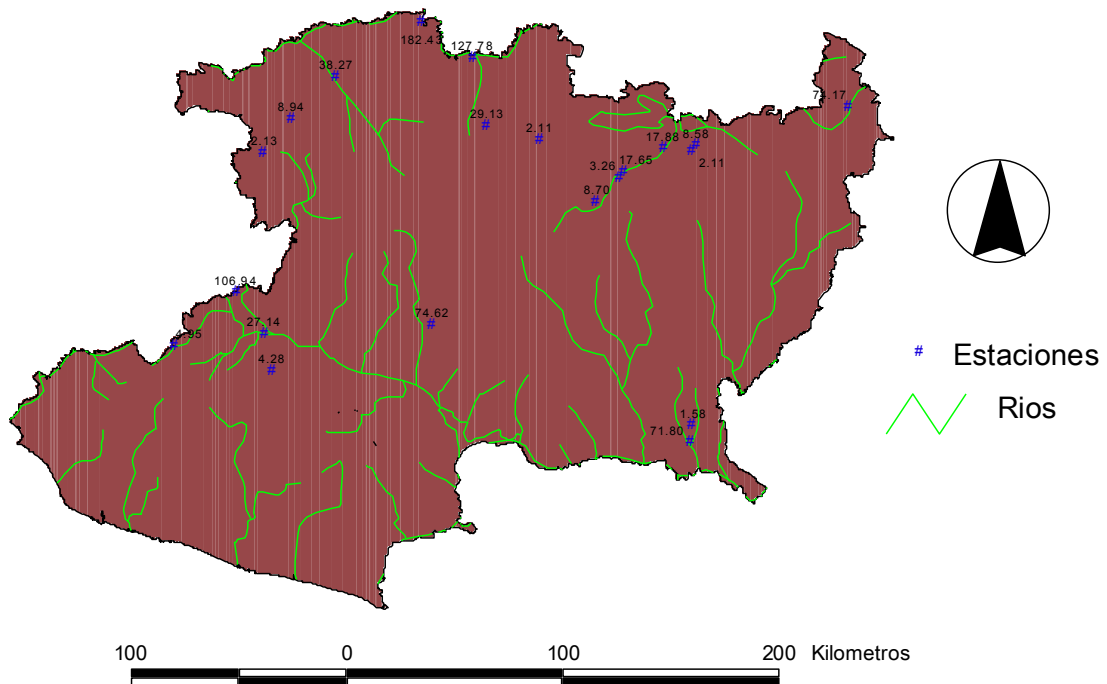


Figura 22. El caudal anual estimado con una probabilidad de ocurrencia de 80% para las estaciones hidrométricas del estado de Michoacán, México.

CONCLUSIONES

Los recursos hídricos del estado de Michoacán constituyen estratégicamente una base para el desarrollo de una zona de las mas pobladas del país. El estar ubicado entre las cuencas del río Balsas y el río Lerma la sitúa en una región que tiene grandes problemas en cuanto al suministro presente y futuro de agua para satisfacer las demandas con la cantidad y la calidad necesarias. La planeación del crecimiento tanto agrícola, industrial, poblacional y ambiental debe estar basado en la capacidad que tengan los ecosistemas de proveer el agua suficiente en calidad y cantidad.

La presión por los recursos hidrológicos ante el crecimiento de la población aumentara, pues se proyecta que para el año 2030 el estado de Michoacán contara con mas de 4 millones de habitantes, ante lo cual el agua será un recurso estratégico para el desarrollo y el mantenimiento del nivel de vida de los habitantes.

Se encontró para el Estado de Michoacán una precipitación promedio de

Es por ello que se requiere información acerca de los recursos hidrológicos, que incluya datos que permitan hacer proyecciones de las necesidades futuras. Para poder hacer estimaciones acerca de los volúmenes es necesario ubicar estaciones de monitoreo de caudales y de la calidad de estos, de manera que se puedan hacer estimaciones confiables. A continuación se describe parte de la oferta y demanda por el agua a nivel nacional, cuya historia es similar a la de muchos estados del país, incluyendo Michoacán.

En México, la agricultura utiliza el 79% del consumo total del agua en el país y se pierde entre 30% y 50% del agua por bajas eficiencias de conducción hacia las parcelas y aplicación a los cultivos. A tal grado que las pérdidas en

conducción son mucho mayores al volumen sumado de agua potable e industrial consumido en todo el país durante un año. Igualmente las pérdidas anuales sólo por sobre consumo en los cultivos son del orden del 10% del agua distribuida a pie de parcela, lo que representa 1.2 veces mayor que el consumo nacional para uso industrial utilizado en el año de 1995. El total de la superficie cultivada en México, el 70% es de temporal y el 30% de riego. Podría asegurarse que esta composición es positiva para el país, si se compara con 84% y 16% de temporal y riego respectivamente, del promedio mundial. Es importante también considerar que los cinco cultivos predominantes en las áreas de riego en México son: maíz, trigo, frijol, caña y sorgo, ya que ocupan casi el 50% de la superficie sembrada bajo riego, no son precisamente los de más alto valor en el mercado local.

Otro uso importante del agua es el industrial, ya que representa aproximadamente el 4% de la extracción del agua en el país; de 5 km³ que extrae este sector anualmente, se consumen 2.5 km³. El 90% aproximadamente es abastecido por fuentes propias y el resto se abastece de tomas especiales para uso industrial, que proveen las redes municipales.

Del total del consumo industrial, el 50% se utiliza para enfriamiento, el 35% en procesos; el 5% en calderas y el 10% en servicios. Casi el 80% del consumo de agua de este sector lo realizan solo seis ramas industriales, a saber: azucarera, química, petróleo, celulosa y papel, textil y bebidas. Se estima que el agua de primer uso que realiza el sector industrial podría reducirse de un 40% a 80% si se extendieran (por ejemplo, en enfriamientos) las prácticas de re uso y se instalaran implementos ahorradores.

El uso del agua municipal, representa en volumen el 5% de la extracción total del agua en México. Sin embargo, dado el crecimiento demográfico de los centros urbanos, el suministro de agua potable para las grandes ciudades ha llegado a agotar las fuentes locales de abastecimiento, presentándose la necesidad de importar volúmenes de agua de cuencas lejanas, con erogaciones importantes de gasto público. Más de la mitad del agua potable producida, se consume en menos de cien ciudades grandes y medias, el resto en las otras 156,502 localidades del país.

Existe una gran disparidad en la distribución de las obras y servicios en las poblaciones urbanas y en las comunidades rurales. En las ciudades de más de 50,000 habitantes, por lo general, las coberturas del servicio de agua potable son cercanas al 100% y las de alcantarillado de 94%, en promedio; por el contrario, en las comunidades rurales, sólo 60% y 25% de los habitantes tienen acceso a servicios de agua potable y alcantarillado, respectivamente.

El agua tiene un uso ambiental importante y tradicionalmente poco considerado que es el que se refiere a la demanda natural que requieren los ecosistemas para su salud, vitalidad y funcionamiento. También este uso necesita contar con la cantidad y calidad adecuada del líquido. La afectación que se haga de este equilibrio incide directamente en la oferta natural del agua, porque puede alterar el ciclo hidrológico y los ecosistemas al romperse el balance físico-químico entre la fase líquida del agua en la superficie, la gaseosa en el aire y la evapotranspiración vegetal. El hombre, argumentando la necesidad de crecimiento económico, se empeña en ocasiones en realizar obras artificiales, que no consideran adecuadamente el impacto ambiental que producen y, comúnmente, se alteran los volúmenes de los caudales naturales en las corrientes o depósitos; o bien, se vierten indiscriminadamente contaminantes en los cuerpos de agua. El desarrollo sustentable debe reconocer este uso natural y cuantificar las demandas de agua que requiere la preservación de los bienes inherentes al equilibrio ecológico, como el suelo, las áreas forestales, la selva y la biodiversidad.

En México, es necesario trabajar más en este aspecto y establecer normas que aseguren los volúmenes mínimos para conservar los cuerpos de agua existentes. La creciente necesidad de un conocimiento del agua disponible para usos agrícola, industrial, doméstico y ambiental hace necesario el conocimiento del agua disponible para estos usos a partir de balances hidrológicos basados en el comportamiento de las variables hidrológicas de mayor importancia como son precipitación, evapotranspiración y escurrimiento.

BIBLIOGRAFIA

- Aparicio-Mijares, F.** 2005. Fundamentos de Hidrología de superficie. Editorial Limusa, Mexico.
- Comisión Nacional del Agua.** 2005. Síntesis de las Estadísticas del Agua en México, México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Conabio.** 1998. "Climas". Escala 1: 1 000 000. México
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Conabio.** 1998. "Edafología". Escala 1: 1 000 000. México
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Conabio,** 1998. "Uso de suelo y vegetación modificado por Conabio". Escala 1: 1 000 000. México
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Conabio.,**1998. "División política estatal ". Escala 1: 1 000 000. México
- Dunne, T.,L.B. Leopold,** 1943. Water in Environmental Planning, W.H. Freeman and Company, New York.
- Johnson, N., Revenga, C. and Echeverria, J,** 2001. Managing water for people and nature Science 292, 1071-1072.
- Mintegui, J, Lopez, F.** 1990. La ordenación Agrohídrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria – Gasteiz. España. 306 p.
- Navar, J., E. Rodríguez.,** 2002, Caracterización de las superficies agrícolas y sus volúmenes de irrigación en la cuenca del río San Juan, México. Investigaciones Geográficas, UNAM Num. 47, 2002

Postel, S, 1993. The politics of water. World Watch, Jul.-Aug. 1993. p. 10-18.

Shiklomanov, I., A., 1997. Assessment of Water Resources and Water Availability in the World. Background Report to Comprehensive Assessment of Freshwater Resources of the World.

Témez, J, 1978. Cálculo Hidrometeorológico de Caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p.

TRAGSA Y TRAGSATEC, 1994. Restauración Hidrológica Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Empresa de Transformación Agraria S.A., Tecnologías y Servicios Agrarios S.A.. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. 902 p.

UNDP, 1999. Human Development Report 1999 (HDRO), UNDP , 1999

World Meteorological Organization-Geneva, CH, WMO, 1997. Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm, Sweden, Stockholm Environment Institute (SEI).

TENDENCIAS EN LOS CAUDALES BASE, DIRECTO Y TOTAL EN RIOS DEL ESTADO DE MICHOACAN

RESUMEN

En este reporte se analizaron las tendencias en los caudales de 12 estaciones hidrométricas del estado de Michoacán. Se utilizaron registros diarios de flujo y se usó el programa RORA para la separación del flujo base y directo. Se evaluaron los caudales anuales utilizando una regresión lineal simple y la prueba estadística no paramétrica Mann-Kendall. Se encontró disminución significativa en el 40% de las estaciones y un aumento en el 16% de estas. Los resultados proveen un indicador del impacto de los factores climáticos y antropogénicos que están afectando la recarga de acuíferos en el estado de Michoacán, México.

ABSTRACT

In this technical report, we aimed to analyze trends and magnitude in trends of three discharge parameters of twelve gauging stations. The RORA program was utilized for separating direct and base flow from daily discharge. Annual discharge data was evaluated using simple linear regression and the Mann-Kendall non-parametric statistical tests for detecting tendencies and estimating slopes of change. A decreasing trend was found in 40% of the gauging stations and an increasing trend in 16% of the gauging stations. This results provide an assessment of the impact of anthropogenic activities and climatic factors affecting the groundwater recharge in the Mexican state of Michoacán.

INTRODUCCIÓN

Las aguas superficiales y subterráneas son una parte vital de nuestro sistema de agua dulce. Los usos principales del agua superficial y subterránea son el público, agrícola, e industrial. Recientemente se ha reconocido también el uso ambiental de ambos sistemas. Sin embargo, el recurso está amenazado por la presión que ejercen los diferentes usos además de la contaminación. En muchos lugares se usa el agua de

estos sistemas con mayor rapidez que con la que la naturaleza la puede reemplazar. Algunos factores incipientes, como la posibilidad del comercio internacional del agua, el rápido crecimiento de la población en zonas de alta demanda del líquido y el cambio climático, aumentarán las presiones de las aguas superficiales y subterráneas.

Muchos investigadores afirman que el acceso al agua limpia será el problema ambiental del siglo XXI. Un estudio reciente prevee que si los patrones actuales de consumo continúan, al menos 3,500 millones de personas o 48% de la población mundial vivirá en cuencas de agua presionadas por sobre uso y contaminación en 2025 (World Resources Institute, 2000).

Las aguas superficiales y subterráneas interactúan en una cuenca, de tal manera que en ocasiones las aguas subterráneas drenando acuíferos emergen como veneros, ojos de agua, manantiales, etc. alimentando los caudales. En otras ocasiones, las aguas superficiales sirven de recarga de acuíferos. En una misma cuenca estas relaciones son complejas y variables tanto en espacio como en tiempo. La función típica de los humedales, como los cenegales de las praderas que se encuentran en terrenos altos, suele ser recargar los acuíferos que yacen bajo su manto, mientras que los que se encuentran en altitudes menores suelen recibir la mayoría de sus aguas del subsuelo. La contribución de las aguas subterráneas al caudal de ríos y arroyos varía según la geología superficial y otros factores. En algunas zonas de Ontario, en donde predominan los suelos de cieno y barro, las aguas superficiales contribuyen con menos de 20% de las corrientes. En donde dominan la arena y la grava pueden contribuir con 60% o más del total del flujo (IJC, 2000). Las aguas subterráneas contribuyen con una cantidad significativa del suministro general de agua en los Grandes Lagos: desde 22% del suministro al lago Erie, hasta 42% del suministro a los lagos Hurón y Ontario (IJC, 2000).

El Estado de Michoacán se encuentra ubicado en una zona en donde existe el 36% de grado de presión sobre los recursos hidrológicos (CONAGUA, 2005) por su ubicación en dos cuencas señaladas con problemas futuros para abastecer el suministro de agua a todos los usuarios: El Río Lerma Santiago y el Río Balsas. En el estado de Michoacán todos los acuíferos de la zona norte,

donde reside gran parte de la población se encuentran sobre explotados. La presión sobre las aguas superficiales y subterráneas continuará creciendo por el crecimiento demográfico y por causas del desarrollo, la constante deforestación, urbanización y fragmentación de ríos y cuerpos de agua. Este reporte se justifica por plantear como objetivos la separación de los caudales base y directo de los caudales totales medidos diariamente y tratar de entender las tendencias temporales de estos componentes del ciclo hidrológico.

ANTECEDENTES

La infiltración es el movimiento del agua a través de la superficie del suelo. Se puede decir que la infiltración es un proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de su superficie y queda retenida en el o alcanza un manto freático o acuífero, incrementando el volumen almacenado (Arnaiz, 1976).

Zhuoheng *et al.*, (2002) encontraron que el nivel del acuífero sigue un patrón similar a la fluctuación de recarga, con un tiempo de retraso que depende de las características del acuífero, patrones de recarga así como de la distancia entre los sitios de recarga y los sitios de medición. Proponen un modelo empírico que relaciona características climáticas con el nivel del acuífero, encontrando un coeficiente de correlación de 0.92 entre la medida y la estimada.

Fazal *et al.*, (2004) encontraron una recarga de 45% de la precipitación media anual en cuatro cuencas de la Isla Miyakojima en Japón utilizando un modelo SMAR (Medición de la humedad del suelo y recorrido) con una eficiencia del modelo de 0.92. Este modelo tiene el potencial de estimar recarga utilizando solo precipitación, evaporación y nivel del agua subterránea.

Eckhardt *et al.*, (2004) utilizando un modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) investigaron el impacto del cambio climático y la influencia del elevado CO₂ en la recarga de acuíferos y flujos en Europa. Los resultados indican que probablemente la recarga media anual y los flujos de cauces no cambien. Sin embargo en el verano la recarga media mensual y el flujo se reduciría 50%

causando problemas de calidad de agua, extracción de acuíferos y generación de energía eléctrica.

El programa RECESS es usado para determinar el índice de recesión y para definir la curva maestra de recesión (MRC) del análisis de los registros diarios de flujo en una corriente. El método pretende el análisis de la recesión de la corriente cuando no hay recarga y cuando todo el flujo es de corrientes subterráneas. De acuerdo al modelo desarrollado por Rorabaugh (1964) la recesión será lineal en una grafica del logaritmo del flujo como una función del tiempo. El grado de recesión puede expresarse como el índice de recesión por ciclo logarítmico, y esta variable se necesita cuando se usa el método Rorabaugh para estimar recarga ((Wilder and Simmons, 1978; Bevans, 1986; Gerhart y Lazorchick, 1988; Hoos, 1990).

Lee *et al.*, (2002) estimaron la recarga y el flujo base para varias estaciones a partir de registro de caudales diarios utilizando los programas de computo RECESS y RORA para la estimación de recarga y el programa PART para la separación del flujo base y directo.

MATERIALES Y METODOS

El área de estudio. El estado de Michoacán está situado en la región centro occidente de la República Mexicana entre las coordenadas geográficas extremas de 17°55' y 20°24' de latitud norte; y 100°04' y 103°44' de longitud oeste. Colinda al norte con los estados de Jalisco, Guanajuato y Querétaro; al este con Querétaro, México y Guerrero; al sur con Guerrero y el Océano Pacífico; al oeste con el Océano Pacífico, Colima y Jalisco. La extensión territorial que ocupa es de 5 883 695 ha, que corresponde al 3% de la superficie del país (Figura 2.1).

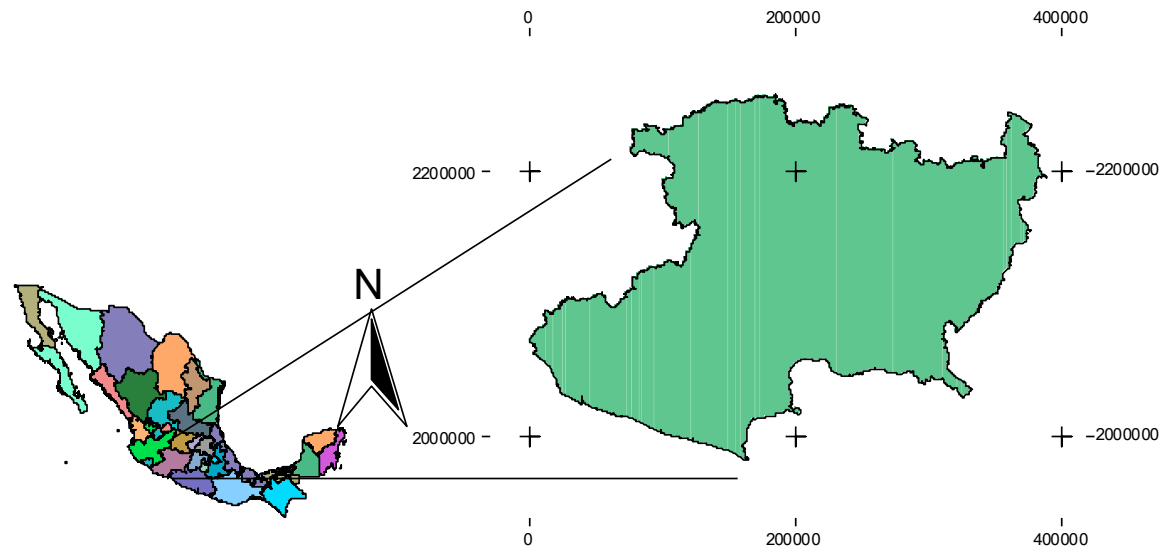


Figura 2.1 Ubicación del Estado de Michoacán en la Republica Mexicana

CLIMA: Los climas predominantes son el templado, el cálido y los de transición. El primero domina en la parte norte del estado en aproximadamente el 30% de la superficie estatal, el cálido con sus variantes seco y subhúmedo domina en el sur en 44% de la superficie estatal, y las de transición en el 26% del estado, incluyendo en estos a los semifríos, que se encuentran en las partes más altas de las sierras. Las temperaturas medias anuales van desde los 10 a 14°C en los climas semifríos y hasta los 28 a 29.5°C en los cálidos secos. La precipitación por el contrario va desde los 400 mm anuales en los climas cálidos secos, hasta los 1700 mm en los climas templados húmedos. Los climas que prevalecen son el C(w2) que es un clima templado, subhúmedo, BS1 (h') w que es semiárido calido, Aw1 es cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C , Aw0 calido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C, (A)C(w0) es el clima semicálido subhúmedo del grupo C, (A)C(w1) es semicálido subhúmedo, C(w0) es templado subhúmedo y C(m) es el clima templado húmedo (Figura 2.2).

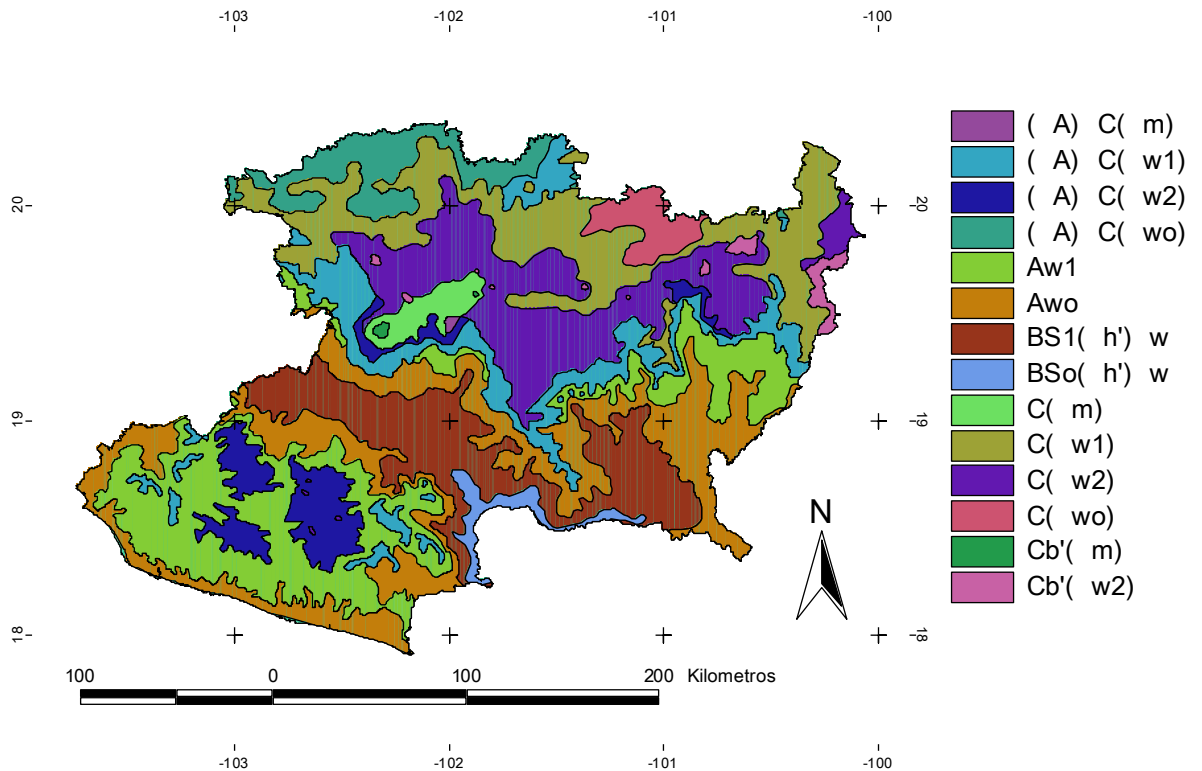


Figura 2.2 Climas del Estado de Michoacán.

VEGETACIÓN: El estado de Michoacán se encuentra en una zona entre el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur. Se localiza entre el Océano Pacífico y el Altiplano Mexicano. Por esta razón se encuentran una variedad de climas y de tipos de vegetación. Dentro de los tipos de vegetación representativos se encuentran los siguientes.

Selva mediana subperennifolia. Se localiza a lo largo de la Vertiente del Pacífico, en planicies, cañadas, partes cercanas a los arroyos y abanicos aluviales, así como también dentro del Valle de Apatzingán en altitudes de 10 a 600 m. Ocupa una superficie de 217,300 ha. Las principales especies que caracterizan esta comunidad son: *Brosimum alicastrum*, *Cydistax donnell-smithii*, *Orbignya guacuyule*, *Achras zapota*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Cedrella mexicana*.

Selva mediana subcaducifolia. Se localiza en la zona costera, en las estribaciones de la sierra hacia el mar y cañadas húmedas de la zona de "tierra

caliente" del estado. Se encuentra entre los 200 y 1,100 metros sobre el nivel del mar. Las principales especies son: *Tabebuia rosea*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Rosedoendron Donnell-Smithii*, *Ceiba pentandra* y *Astronium graveolens*.

Palmares. Se localizan en la zona costera, a excepción de un área pequeña en el centro del estado. Se encuentra de 0 a 1,000 metros sobre el nivel del mar. Las especies características son *Sabal pumos* y *Orbignya guacuyule*.

Sabana. Ocasionado por la acción del hombre, este tipo de vegetación se establece después de la tala, mediante el uso repetitivo del fuego, lo que modifica las características del suelo y se establecen poblaciones de herbáceas, especialmente gramíneas y otras familias. Las principales especies son: *Crescentia alata* y *Pithecellobium dulce*.

Selva baja caducifolia. Está ampliamente distribuido en el estado, en las regiones de tierra caliente y del bajío. Se localiza de 300 a 1,900 metros sobre el nivel del mar. Las principales especies son: *Lysiloma acapulcensis*, *L. divaricata*, *Bursera excelsa*, *Plumeria rubra*, *Ipomoea arborescens*, *Prosopis laevigata*, y *Eysenhardtia polystachya*.

Selva baja caducifolia espinosa. Se le encuentra principalmente en los municipios del Valle de Apatzingán. La altitud varía de 40 a 800 m. Las principales especies que lo constituyen son: *Crescentia alata*, *Cercidium praecox*, *Prosopis laevigata*, *Pithecellobium dulce*, *Celtis iguanaea* y *Caesalpinia coriaria*.

Bosque linearifolio. Se localiza en la zona montañosa del Eje Neovolcánico Transversal. La altitud a la que se encuentra es de 2,800 m. Abarca una superficie de 45,000 ha. La principal especie es el oyamel *Abies religiosa*, pino (*Pinus* spp) y encinos (*Quercus* spp).

Bosque aciculifolio. Se encuentra a todo lo largo de la región montañosa central sobre el Eje Neovolcánico Transversal. Se localiza en altitudes de 1,200 a 3,000 m, con clima templado subhúmedo. La vegetación esta constituida en forma principal por pino *Pinus* spp. En forma aislada se encuentran *Quercus* spp., *Arbutus xalapensis* y *Crataegus pubescens*.

Bosque aciculiesclerofilo. Se localiza en la región montañosa del Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur. En altitudes de 1,000 a 2,700 m en climas templados húmedos y subhúmedos. Los elementos arbóreos que lo componen son *Pinus* spp. Y *Quercus* spp.

Bosque esclerofilo caducifolio. Se localiza en gran parte del estado sobre los dos macizos montañosos, entre los 800 a 2,000 m sobre el nivel del mar. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano y las las principales especies son diferentes especies de encino *Quercus* spp.

Bosque caducifolio espinoso. Se localiza en el norte del estado, en la región del bajío, entre los 1,300 a 1,900 m de altitud. Está constituida por elementos arbóreos como *Prosopis laevigata* y *Pithecellobium dulce*.

Matorral alto espinoso crasicaulescente. Se localiza principalmente en la parte más cálida de Tierra Caliente, a lo largo de la ribera del río Balsas, en altitudes que van de 200 a 400 m. Las principales especies son: *Lemaireocereus weberi*, *Opuntia* sp, *Caesalpinia* sp, *Cercidum praecox* y *Prosopis laevigata*.

Pastizal inducido. Este tipo de vegetación también tiene su origen por la intervención humana. Resulta del desmonte de la vegetación nativa y a través de su recuperación presenta diversas poblaciones vegetales. Generalmente está formado por especies de la familia Gramineae, pero abundan especies herbáceas, sobre todo cuando a estos tipos de vegetación se les da un mal manejo. Además puede encontrarse en su interior especies arbóreas y arbustivas cuyos géneros dependen de las características del tipo de vegetación que le da origen (Figura 2.3).

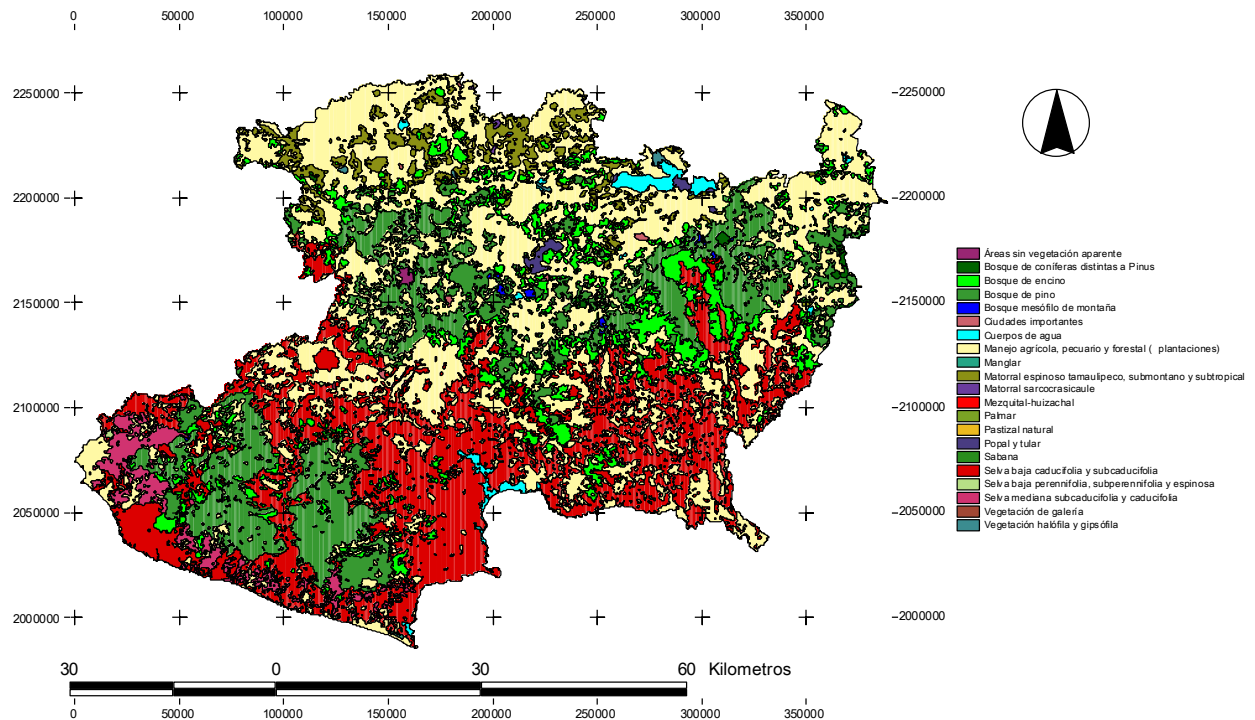


Figura 2.3 Vegetación del Estado de Michoacán (Fuente: CONABIO, 1998).

SUELOS. El estado de Michoacán presenta una gran variedad de suelos. Destacan por su importancia el vertisol, que cubre una superficie de 18.7% estatal. Este suelo se caracterizan por las grietas anchas y profundas que presentan en época de sequía, son suelos arcillosos, y pegajosos cuando están húmedos, y muy duros cuando están secos. El luvisol representa el 15.2% y se caracteriza por tener acumulación de arcilla en el horizonte b. El litosol se distinguen por tener una profundidad menor a los 10 cm. Se localizan en las sierras, en laderas, barrancas y malpaís, así como en lomeríos y algunos terrenos planos. Tiene características muy variables, pues pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona en donde se encuentren, de la topografía y del mismo suelo. Estos tienen una superficie de 843 655 ha y representan el 14% de la superficie (CONABIO, 1998). El andosol es un suelo derivado de cenizas volcánicas, profundos y bien drenados. Tienen una superficie de 843 655 ha que representa el 14% del Estado. El regosol es un suelo de textura media predominando la

pedregosidad, su espesor es mayor de 10 cm. Este tipo de suelo tiene una superficie de 784 575 ha y cubre una superficie estatal del 15%. El principal distintivo de los feozem es una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes. Son suelos abundantes en nuestro país, y los usos son variados, en función del clima, relieve y algunas condiciones del suelo. Tiene una superficie de 707 896 ha que significa el 12% del total estatal (Figura 2.4).

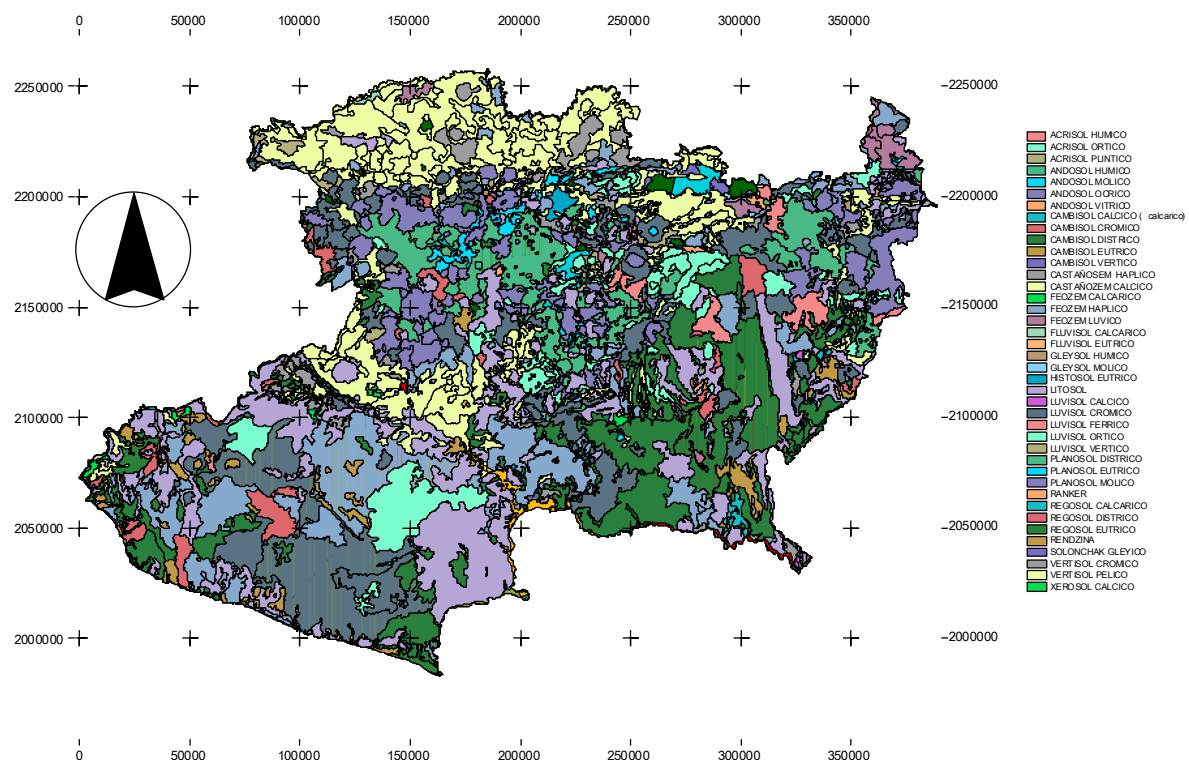


Figura 2.4 Tipos de Suelo del Estado de Michoacán (Fuente: CONABIO, 1998).

ANÁLISIS DE ESTACIONES

Se analizaron los datos de caudales diarios registrados en las estaciones hidrométricas establecidos en varios ríos. Los requisitos de los datos fueron que tuvieran registros diarios ininterrumpidos y que cumplieran el supuesto de medir flujos de corrientes sin regulación, excluyendo los canales o aquellas estaciones que fuera posible medir un índice de recesión y así poder determinar el índice de recesión por ciclo logarítmico diario.

En total doce estaciones que cumplieron con estas características fueron utilizadas para separar el flujo base y directo. Las coordenadas de las estaciones de registro de caudales se encuentran ubicadas principalmente en la zona norte y centro del estado (Figura 2.5).

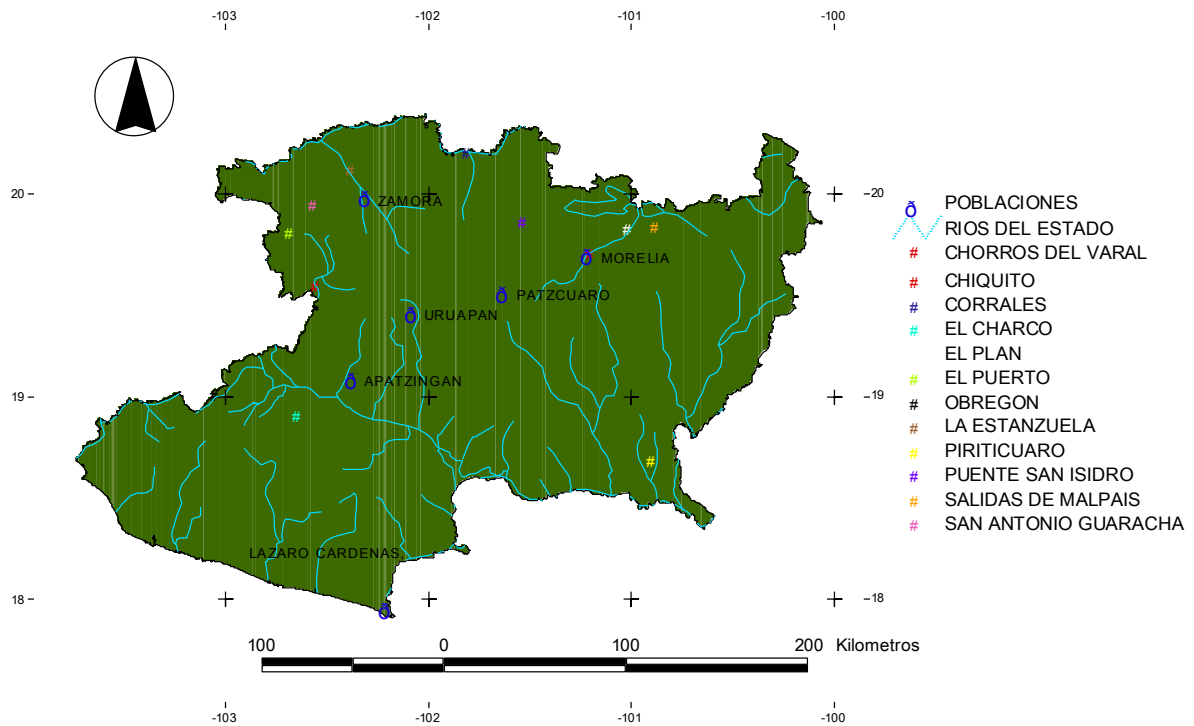


Figura 2.5. La localización de las estaciones hidrométricas del Estado de Michoacán utilizadas para la separación de los caudales base y directo.

Los datos contaron con registros diarios entre 13 y 58 años (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estaciones hidrométricas analizadas en el estado de Michoacán para la separación de los caudales base y directo.

No.	ESTACION	CORRIENTE	SUBCUENCA	LONG	LAT	AÑOS
12224	CHQUITO	RIO CHQUITO	RIO GRANDE DE MORELIA	-101.19	19.70	48
12233	CORRALES	RIO LERMA	RIO LERMA	-101.80	20.20	58
12310	LA ESTANZUELA	RIO DUERO	RIO LERMA	-102.37	20.12	49
12323	MALPAIS	RIO QUERENDARO	LAGO CUITZEO	-100.88	19.83	25
12338	SAN ANTONIO	ARROYO LAS LIEBRES	RIO SAHUAYO	-102.56	19.95	46
12415	ISIDRO	RIO DE LA PATERA	RIO ANGULO	-101.53	19.86	39
12588	EL PLAN	RIO GRANDE DE MORELIA	LAGO CUITZEO	-101.01	19.82	28
18095	EL PUERTO	RIO COTIJA	RIO ITZICUARO	-102.67	19.80	43
18351	PIRITICUARO	ARROYO CHIHUERO	RIO HUETAMO	-100.89	18.68	22
18452	EL CHARCO	RIO CHILA	RIO TEPALCATEPEC	-102.64	18.90	15
18532	CHORROS	RIO ITZICUARO	RIO TEPALCATEPEC	-102.54	19.55	23
18553	OBREGON	RIO TAIXTAN	RIO OTATES	-103.05	19.00	13

Antes de comenzar el análisis de los datos es necesario observar que las estaciones tengan periodos prolongados de mediciones y que representen mejor los periodos de recesión. Los registros diarios se arreglan en el formato establecido en el programa. Al analizar los datos de una estación es necesario asegurarse de que no existan espacios entre los datos, y estos se analizan en el modulo SCREEN de los programas para el calculo de recarga creado por Rutledge (1998).

El programa RECESS es usado para determinar el índice de recesión y para definir la curva maestra de recesión (MRC) del análisis de los registros diarios de flujo en una corriente. El método pretende el análisis de la recesión de la corriente cuando no hay recarga y cuando todo el flujo es de corrientes subterráneas. De acuerdo al modelo desarrollado por Rorabaugh (1964) la recesión será linear en una grafica del logaritmo del flujo como una función del tiempo.

El programa RECESS es un método empírico para describir las características de la recesión. El programa escanea una base de datos y encuentra periodos de recesión continua. Cuando encuentra un segmento, el usuario puede decidir si lo analiza, y si es así, que partes representan condiciones cercanas a la linealidad (en la escala semilogaritmica) que puede ser cuantificada para el índice de recesión.

Después de que el usuario ha seleccionado un segmento el programa calcula una expresión matemática [1] de la forma

$$t = K1 \times \text{Log}Q + K2 \quad [1]$$

donde t es tiempo en días, $\text{Log}Q$ es el logaritmo del flujo en pies cúbicos y $K1$ y $K2$ son los coeficientes determinados por una regresión lineal. Esta expresión se usa para derivar el índice de recesión (días por ciclo logarítmico de la descarga), que es el valor absoluto de $K1$.

Después de que se obtiene la solución, el programa procede con el próximo periodo de recesión continua y repite este proceso hasta que ha analizado el total de los segmentos. Una vez que ha encontrado todos los periodos de recesión en el periodo de interés, puede realizar cálculos para la determinación de la curva maestra de recesión (MRC). El programa usa la ecuación 1 para derivar el índice de recesión (K) para cada una. El programa determina el que más se aproxime a la linealidad para K como una función del logaritmo de Q . Los coeficientes de esta ecuación se usan para obtener la MRC que es una expresión polinomial del tiempo como una función de $\text{Log}Q$

$$t = A \times (\text{Log}Q)^2 + B \times (\text{Log}Q) + C \quad [2]$$

donde t es tiempo y A , B y C son coeficientes. La MRC es el resultado de la integración de la mejor ecuación para K como una función del $\text{Log}Q$ (Rutledge, 1998).

Una vez obtenidos los índices para cada estación se corrieron en el programa PART, que es un modulo del programa RORA, el cual calcula y separa el flujo base y directo a escalas diaria, mensual y anual.

Para detectar las tendencias en los caudales se empleo la prueba paramétrica de F y no paramétrica Mann-Kendall. Se utilizaron los datos de flujo base, flujo directo y flujo total de las 12 estaciones para detectar las tendencias en forma estadística. Adicionalmente se calculo el parámetro que define la pendiente de ambas relaciones.

La prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall se utiliza para la detección de tendencias estadísticamente significativas utilizando las series de tiempo que se generaron en el programa RORA para los caudales base y directo. Además se utilizo también el caudal total diario que provee la CNA. La prueba revela la presencia o ausencia de tendencias monotónicas crecientes o decrecientes. La formulación matemática de la prueba de Mann-Kendall se describe en las ecuaciones [3], [4] y [5].

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S > 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad [3]$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \end{cases} \quad [4]$$

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad [5]$$

donde x_j y x_k son los valores anuales en j y k años, q es el número de grupos empatados y $t_{p\theta}$ es el número de valores en el grupo $p\theta$. La presencia-ausencia de la tendencia estadísticamente significativa se evalúa usando el valor de Z , el cual se distribuye normalmente.

La prueba no paramétrica del método del Seno se usó para detectar la magnitud de cambio de las variables de la descarga en tiempo. La pendiente se describe como el cambio de la variable por unidad de tiempo. El método del seno se usó suponiendo una tendencia lineal en escalas temporales cortas. La ecuación [6] describe el método del seno.

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad [6]$$

donde $j > k$.

La ecuación [6] es el valor de la mediana de la pendiente general, con un número de estimaciones de $N = n(n-1)/2$ de Q_i .

La prueba de F también detecta tendencias estadísticamente significativas a través del análisis de varianzas de la aleatoriedad y de la ecuación ajustada a la relación caudal – tiempo. El valor resultante del índice de las dos varianzas se distribuye F , con grados de libertad de la varianza de la ecuación y de la varianza aleatoria. El ajuste de una ecuación lineal dada por la ecuación [7]

$$Y = \alpha + \beta(X) \pm \varepsilon_i \quad [7]$$

Donde Y = caudal, X es el tiempo y α = la intercepta o el punto de salida de la línea recta cuando el eje de Y corta al eje de x en el origen, β es la pendiente de la regresión.

Utilizando la prueba de cuadrados mínimos por el conjunto de ecuaciones en [8] se provee la solución para estimar la intercepta y la pendiente de la ecuación lineal.

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^j (y_i - \hat{y}_i)^2}{\partial \alpha} = \frac{\partial \sum_{i=1}^j (y_i - \alpha + \beta(x_i))^2}{\partial \alpha}$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^j (y_i - \hat{y}_i)^2}{\partial \beta} = \frac{\partial \sum_{i=1}^j (y_i - \alpha + \beta(x_i))^2}{\partial \beta}$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\alpha = \bar{y} - \beta(\bar{X})$$

La prueba de F se estima a partir de la varianza de la ecuación [7] y de la estimación de la varianza aleatoria las cuales surgen de las siguientes dos ecuaciones:

$$CMM = \frac{\sum_{i=1}^j (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{GLM} \quad CMM = \frac{\sum_{i=1}^j (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{p}$$

$$CME = \frac{\sum_{i=1}^j (y_i - \hat{y}_i)^2}{GLE} \quad CMM = \frac{\sum_{i=1}^j (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1}$$

Donde: y_i , son cada uno de los valores observados del caudal x , \hat{y} = son cada uno de los valores predichos por la ecuación [7] del caudal x para cada valor en tiempo, \bar{X} , \bar{y} = es el promedio de los valores de la variable Y .

La prueba de F se realiza por estimar el índice de las dos varianzas, del error, CME, y de la ecuación, CMM, con la ecuación siguiente. Para esto se calcula la integral de la distribución de F desde o hasta F para determinar la significancia estadístico.

$$pr \geq F = 1 - \int_0^F f(F) dF$$

RESULTADOS

Los datos hidrométricos de las estaciones analizadas presentan una variación espacial muy amplia en los caudales anuales promedio desde 8.3 M m³ (Piriticuario) hasta 1163.3 M m³ en la estación Corrales (Cuadro 2).

Cuadro 2. Las proporciones de los caudales base y directo en función del caudal total para las estaciones hidrométricas analizadas del estado de Michoacán, México.

CLAVE	ESTACION	Qb	Qd	DS	T	I.C.	Qa(M m ³)
12224	CHQUITO	0.51	0.49	0.25	226	0.03	612.9
12233	CORRALES	0.79	0.21	0.15	693	0.01	1163.3
12310	LA ESTANZUELA	0.87	0.13	0.08	588	0.01	334.5
12323	SALIDAS DE MALPAIS	0.57	0.43	0.29	261	0.04	51.7
12338	SAN ANTONIO	0.80	0.20	0.11	552	0.01	744.1
12415	PUENTE SAN ISIDRO	0.85	0.15	0.13	468	0.01	18.1
12588	EL PLAN	0.64	0.36	0.24	327	0.03	144.6
18095	EL PUERTO	0.61	0.39	0.34	468	0.03	18.8
18351	PIRITICUARIO	0.65	0.35	0.34	139	0.06	8.3
18452	EL CHARCO	0.79	0.21	0.25	180	0.04	45.4
18532	CHORROS	0.89	0.11	0.11	168	0.02	554.7
18553	OBREGÓN	0.66	0.34	0.30	176	0.04	52.6

Qb= Caudal base, Qd = Caudal directo, DS= Desviación estándar, t = número de meses para correr los analisis, I.C. = intervalo de confianza, Qa = Caudal anual.

Las estaciones presentan un caudal total promedio (\pm intervalo de confianza) de 312 M m³ (\pm 213 M m³) para todas las estaciones hidrométricas analizadas. Los intervalos de confianza tan amplios demuestran que existen factores como el balance hidrológico y el tamaño de las cuencas que están influyendo en la variación espacial tan amplia en los caudales anuales promedio.

En general, el flujo base, que proviene de los acuíferos domina los caudales totales. Del caudal promedio anual, el 72% (\pm 7%) corresponden al flujo base. Esto equivale en promedio a 224 M m³ (\pm 22 M m³). El flujo directo, que se genera durante lluvias importantes, es solo en promedio 28% (\pm 7%) y equivale

en promedio anual a $88 \text{ M m}^3 (\pm 22 \text{ M m}^3)$. Existen estaciones climáticas en donde existe un mejor equilibrio entre el flujo base y directo como lo es la estación Salida del Malpais que genera un caudal anual promedio de solo 52 M m^3 y se localiza en la zona del Altiplano Mexicano, colindando con el estado de Guanajuato.

De acuerdo a los resultados de la prueba de F de la regresión lineal, de las 12 estaciones analizadas 7 presentan tendencias a aumentar en flujo base. De estas solo tres (San Antonio, El Puerto y Chiquito) presentaron diferencias estadísticamente significativas. Las estaciones que mostraron una disminución estadísticamente significativa en el caudal fueron la estación Corrales, con una pendiente de -1.92 para el flujo total, -2.03 en flujo base y una pendiente positiva para el flujo directo y la estación Salidas del Malpais, que muestra tendencias negativas en el flujo base y total, pero un aumento en el flujo directo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Los valores de F y Z y su significancia para los caudales total, base y directo para doce estacione hidrométricas del estado de Michoacán, México.

Qt = Caudal total, Qb= Caudal base, Qd = Caudal directo, + = ($p=0.10$), * = ($p=0.05$), ** = ($p=0.01$), *** = ($p=0.005$).

CLAVE	ESTACION	Prueba de F de la regresión			Valores de Z de Mann-Kendall		
		QTotal	QBase	Qdirecto	QTotal	QBase	Qdirecto
12224	CHQUITO	0.31	0.04	0.85	1.44	2.28*	-0.15
12233	CORRALES	0.09	0.04	0.46	-2.44	-2.8*	-0.16
12310	LA ESTANZUELA	0.94	0.02	0.001	0.49	-1.28	4.42***
12323	MALPAIS	0.02	0.006	0.38	-2.17*	-2.92**	0.47
12338	SAN ANTONIO	0.03	0.04	0.024	2.11*	2.05*	2.49*
12415	ISIDRO	0.66	0.92	0.08	-0.56	-0.21	-1.78+
12588	EL PLAN	0.42	0.31	0.97	-0.89	-1.07	-0.45
18095	EL PUERTO	0.03	0.004	0.33	2.45*	2.63*	1.63*
18351	PIRITICUARO	0.56	0.81	0.37	-1.02	-0.87	-0.79
18452	EL CHARCO	0.78	0.28	0.39	-1.19	-1.68+	-0.4
18532	CHORROS	0.14	0.36	0.09	1.53	0.66	1.42
18553	OBREGÓN	0.56	0.72	0.56	-0.55	-0.92	-0.55

Las tendencias de las pendientes del ajuste de la regresión son variables para los flujos en el estado (Cuadro 2). El 67 % de las estaciones hidrométricas presentan una tendencia negativa en el flujo total y solo dos estaciones son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). El flujo directo ha aumentado en dos estaciones (Corrales y Salidas del Malpais) ya que ha disminuido la infiltración y la recarga de acuíferos al observarse una disminución significativa en los caudales base.

De acuerdo a la prueba de Mann-Kendall el 66% de las estaciones hidrométricas presentan tendencias negativas, pero solo el 40% presentan significancia estadística. La estación Corrales muestra una disminución importante en flujo base (-1.56) y flujo directo (-0.01) y por consiguiente se observa una disminución en flujo total en tiempo.

Del total de estaciones analizadas, el 34% presentan aumentos en sus caudales promedio pero solo la estación San Antonio presenta tendencias significativas en flujo total (0.081), flujo base (0.06) y flujo directo (0.023). La estación La Estanzuela parece aumentar sus flujos directos pero no es su flujo base y total.

La consistencia estadística en el signo para todos los caudales base, directo y total como son las estaciones hidrométricas Chiquito, San Antonio y El Puerto indican cambios climáticos a escala espacio temporal importantes. Por el contrario, las estaciones hidrométricas que mostraron inconsistencia en los signos como son Corrales, La Estanzuela y Salidas del Malpais presentaron por lo general disminución en el caudal base y aumento en el caudal directo. Las posibles causas de este comportamiento son: a) extracciones importantes de agua de los acuíferos, b) reducción de la recarga, c) reducción de la infiltración espacial de la cuenca, d) cambios sutiles en parámetros hidrológicos como son la frecuencia, intensidad, duración de las lluvias; e) otros.

Cuadro 3. Pendientes y sus significancia estadística de la regresión lineal y la prueba de Mann-Kendall entre los componentes del caudal y el tiempo para doce estaciones hidrométricas del estado de Michoacán, México.

CLAVE	ESTACION	Pendiente regresión			Pendiente Mann-Kendall		
		Qt	Qb	Qd	Qt	Qb	Qd
12224	CHQUITO	0.009	0.0009	0.0008	-0.02	-0.01	-0.001*
12233	CORRALES	-1.92	-2.03	0.115	-1.61	-1.56*	-0.01**
12310	LA ESTANZUELA	-0.008	-0.2	0.19	0.04	0.12	0.19***
12323	SALIDAS DE						
	MALPAIS	-0.2	-0.23	0.02	-0.22*	-0.24	0.027
12338	SAN ANTONIO	0.08	0.06	0.02	0.081*	0.06*	0.023*
12415	PUENTE SAN ISIDRO	-0.005	-0.001	-0.004	-0.01	-0.001	-0.004+
12588	EL PLAN	-0.2	-0.2	-0.001	-0.19	-0.21	-0.017
18095	EL PUERTO	0.05	0.042	0.015	0.05	0.02	0.02
18351	PIRITICUARO	-0.02	-0.005	-0.01	-0.04	-0.02	-0.019
18452	EL CHARCO	-0.082	-0.19	0.1	-0.41	-0.4	-0.060+
18532	CHORROS	1.2	0.54	0.65	1.48	0.55	0.52
	Promedio	-0.100	-0.201	0.100	-0.079	-0.021	0.106
	Desviación Estándar	0.715	0.644	0.193	0.786	0.268	0.232
	Intervalo de Confianza	0.405	0.364	0.109	0.444	0.152	0.131

Qt = Caudal total, Qb= Caudal base, Qd = Caudal directo.

El análisis estadístico de las pendientes resultantes de las pruebas de Mann-Kendall y de la ecuación lineal (Cuadro 3) muestran que en general los caudales totales están disminuyendo a una tasa de 0.10 o 0.08 M m³ año⁻¹ de acuerdo con Mann-Kendall o la ecuación de regresión lineal. De igual manera, los caudales base están disminuyendo a una tasa mayor de -0.20 o -0.02 M m³ año⁻¹ de acuerdo con las pruebas realizadas. Al contrario, los caudales directos están aumentando consistentemente en ambas pruebas a una tasa de 0.10 M m³ año⁻¹. Si se considera la prueba de Mann-Kendall, la disminución del flujo base no se compara con el aumento del caudal directo. Esto es un indicador preliminar de cambio climático en la cuenca. La diferencia entre este equilibrio que es de 0.10 M m³ año⁻¹ se puede atribuir a las actividades antropogénicas que modifican con sus actividades sobre la cobertura y el suelo los parámetros hidrológicos tendientes a perturbar la recarga de acuíferos a través de la infiltración y la escorrentía superficial.

En particular, la disminución en los caudales base están drásticamente disminuyendo en la estación Corrales a una tasa de $2.03 \text{ M m}^3 \text{ año}^{-1}$. Actualmente esta estación está presentando un caudal base promedio de $919 \text{ M m}^3 \text{ año}^{-1}$ y la reducción del flujo base a esta tasa indica que para el 2050 solo habrá el 90% del caudal base que se produce actualmente ($827 \text{ M m}^3 \text{ año}^{-1}$). La estación Salida de Malpais presenta en términos relativos una mayor disminución en el caudal base de un promedio actual de $29.5 \text{ M m}^3 \text{ año}^{-1}$, para finales del 2050 solo habrá el 65% del caudal base actual a la tasa de cambio presente ($19 \text{ M m}^3 \text{ año}^{-1}$).

La consistencia estadística en el signo y en la pendiente para todos los caudales base, directo y total como son las estaciones hidrométricas Chiquito, San Antonio y El Puerto indican cambios climáticos a escala espacio temporal importantes. Por el contrario, las estaciones hidrométricas que mostraron inconsistencia en los signos como son Corrales, La Estanzuela y Salidas del Malpais presentaron por lo general disminución en el caudal base y aumento en el caudal directo. Las posibles causas de este comportamiento son: a) extracciones importantes de agua de los acuíferos, b) reducción de la recarga, c) reducción de la infiltración espacial de la cuenca, d) cambios sutiles en parámetros hidrológicos como son la frecuencia, intensidad, duración de las lluvias; e) cambios en la escorrentía superficial, f) una combinación de varios de los factores descritos, g) entre otros.

Esta información destaca la importancia de entender las causas de los cambios en los caudales base y directo de las cuencas como un primer paso en la restauración hidrológica de las cuencas que drenan dentro de los cauces donde se está realizando la hidrometría de los ríos del estado de Michoacán, México.

Los cambios climáticos pueden tener un impacto en los niveles de los acuíferos y la disponibilidad de los recursos hidrológicos. De esta manera, se ha establecido que un incremento en la temperatura resulta en un incremento en la evaporación y transpiración, lo que puede disminuir la recarga de acuíferos. Los cambios sutiles en los patrones de precipitación (frecuencia, cantidad,

numero, intensidad, duración) también tienen un impacto potencial en la recarga y en la producción de caudales directos, ya que la infiltración y la escorrentía superficial son dependientes de estos parámetros (Michaud et al., 2004).

CONCLUSIONES

En los ríos analizados se encontró que el 66% de las estaciones tiene tendencias hacia disminuir sus caudales y el 40% presentan tendencias estadísticamente significativas. Para el 34% de las estaciones se encontraron aumentos notorios en los caudales, pero solo para el 16% este incremento es estadísticamente significativo. Destacan las estaciones hidrométricas de Corrales y Salidas de Malpais cuyos caudales base están disminuyendo y los caudales directo aumentando. Este hallazgo es un indicador parcial de que las cuencas se encuentran siendo disturbadas en los componentes que determinan la promoción de la infiltración o la escorrentía superficial.

Ante la creciente necesidad de un manejo sustentable de los recursos naturales, es necesario impulsar políticas que apoyen el desarrollo de mecanismos para la protección y restauración de cuencas hidrológicas, y así poder asegurar la perenialidad de los caudales para la satisfacción de los usos y usuarios del agua desde el municipio, la industria, la agricultura y el medio ambiente para el bienestar de las sociedades presentes y futuras.

LITERATURA CITADA

- Arnaiz, M.M.** 1976. Hidrológica Subterránea. Ediciones Omega. Barcelona , España 314-361
- Bevans, H.E.** 1986. Estimating stream-aquifer interactions in coal areas of eastern Kansas by using streamflow records, in Rutledge, A.T., 1998, Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow data – update: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, 43 p.

Comisión Nacional del Agua. (2005). Síntesis de las Estadísticas del Agua en México, México.

Eckhardt K and U. Ulbrich. 2003. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range *Journal of Hydrology* 284: 244-252.

Fazal M.A., M. Imaizumi., S. Ishida., T. Kawachi., and T. Tsuchihara. 2004. Estimating groundwater recharge using the SMAR conceptual model calibrated by genetic algorithm *Journal of Hydrology* 303: 56-78.
Gerhart, J.M. and Lazorchick, G.J. 1988, Evaluation of the ground-water resources of the lower Susquehanna River basin, Pennsylvania and Maryland: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2284, 128 p.

Hoos, A.B. 1990. Recharge rates and aquifer hydraulic characteristics for selected drainage basins in middle and east Tennessee: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4015, 34 p.

International Joint Commission (IJC). 2000. Protection of the waters of the Great Lakes: Final report to the governments of Canada and the United States.

Lee K.L, and J. C. Risley. 2002. Estimates of Ground-Water Recharge, Base Flow, and Stream Reach Gains and Losses in the Willamette River Basin, Oregon Water-Resources Investigations Report 01-4215

Michaud, Y, Rivard, C., Marion, J., Rivera, A., and R. Lefebvre. 2004. Groundwater resources and climate change: trends from Eastern Canada. *Eos Transactions. Joint Assembly of the CGU, AGU, SEG and EEGS*, Montreal, Canada 85(17):

Rorabaugh, M.I., 1964, Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow: *International Association of Scientific Hydrology*, Publication 63, p. 432-441.

Rutledge, A.T., 1998, Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge

and discharge from streamflow data – update: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, 43 p.

Wilder, H.B, and Simmons, C.E., 1978, Program for evaluating stream quality in North Carolina: U.S. Geological Survey Circular 764, 16 p.

World Resources Institute. 2000. World Resources 2000. Freshwater systems: Executive summary.

Zhuoheng C, S. E, Grasby and K. G, Osadetz, 2002. Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model Journal of Hydrology 260: 102-117.

ANEXOS

Anexo 1. El Parámetro eta para la precipitación mensual en las estaciones del Estado de Michoacán

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
16002	0.0201	0.3333	0.1002	0.1424	0.0184	0.0377	0.0592	0.0497	0.0274	0.0147	0.0423	0.0562
16003	0.0383	-0.1051	-0.0707	-0.1609	0.0321	0.0132	0.0095	0.0117	0.0071	0.0086	0.0298	0.5553
16005	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0001	0.0000
16007	0.0826	-0.6001	-0.2795	-0.3334	0.2198	0.0217	0.0475	0.0316	0.0366	0.0255	0.0835	-0.1265
16009	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001
16015	-0.2649	-0.0880	-0.1106	0.1983	0.0266	0.0264	0.0224	0.0416	0.0342	0.0246	0.1645	-0.2418
16016	0.0909	0.3971	0.3166	-0.4538	0.0534	0.0400	0.0696	0.0589	0.0420	0.0329	0.1824	0.2587
16017	0.3040	-0.5776	-0.1056	-1.4600	0.0344	0.0315	0.0319	0.0238	0.0222	0.0333	0.2051	-0.3390
16022	0.0624	0.1271	0.3045	0.0776	0.0426	0.0284	0.0344	0.0353	0.0247	0.0306	0.0486	0.0616
16024	0.1207	1.7545	-2.0576	0.0944	0.0362	0.0334	0.0433	0.0112	0.0080	0.0339	0.0432	0.1392
16025	0.4386	-0.3617	-0.0949	-0.0878	0.1079	0.0207	0.0288	0.0394	0.0298	0.0403	0.3573	-1.9760
16027	0.0434	0.4818	-0.5484	0.2319	0.0306	0.0580	0.0464	0.0466	0.0483	0.0324	0.2861	0.2741
16031	0.0670	1.3857	-0.8590	0.4505	0.0381	0.0321	0.0800	0.0769	0.0465	0.0461	0.1061	0.1810
16035	-2.2010	-0.0464	-0.0393	-0.0409	0.0940	0.0293	0.0263	0.0314	0.0264	0.0238	-0.4055	-0.1143
16036	0.0134	0.2381	0.3285	0.0436	0.0075	0.0080	0.0314	0.0251	0.0161	0.0097	0.0080	0.1391
16043	0.0696	0.4149	0.4248	0.1770	0.0358	0.0483	0.0745	0.0741	0.0526	0.0393	0.0321	0.1501
16048	0.0977	1.7252	-5.9370	0.1861	0.0289	0.0371	0.0635	0.0574	0.0308	0.0438	0.0650	0.0297
16049	0.0481	-0.1344	-0.0809	0.0463	0.0232	0.0555	0.0756	0.0380	0.0276	0.0229	0.0627	3.3370
16050	0.0798	0.9637	-0.8967	0.1295	0.0416	0.0381	0.0505	0.0496	0.0395	0.0322	0.0903	0.1281
16051	-0.5794	-0.3294	0.0429	-0.0835	0.0696	0.0319	0.0330	0.0396	0.0176	0.0205	-0.1108	-0.2577
16052	0.0495	-0.2587	-0.5211	0.1180	0.0466	0.0499	0.0508	0.0549	0.0389	0.0362	0.6283	0.2632
16055	0.2118	-0.1551	-0.1302	0.2595	0.0627	0.0250	0.0257	0.0214	0.0268	0.0478	0.2427	-2.6354
16058	0.5291	-0.1071	-0.1599	0.1005	0.0489	0.0268	0.0318	0.0370	0.0250	0.0229	0.0573	0.8003
16059	-0.0995	-0.0671	-0.0431	-0.1342	0.0372	0.0159	0.0423	0.0547	0.0321	0.0191	1.7350	-0.2673
16060	0.0432	0.2578	-0.4835	0.1120	0.0512	0.0266	0.0609	0.0639	0.0389	0.0491	0.0615	0.2698
16061	0.1230	-0.5928	-0.4266	0.0956	0.0422	0.0507	0.0509	0.0633	0.0438	0.0229	0.1378	0.0919
16062	-0.0579	-0.0212	-0.4312	-0.1659	0.0659	0.0144	0.0111	0.0138	0.0103	0.0270	-0.3932	-0.2285
16063	0.1686	0.1752	-2.1438	-0.3152	0.0261	0.0283	0.0429	0.0420	0.0171	0.0225	0.1133	0.1041
16065	0.3631	-0.4944	-0.1652	0.0240	0.0195	0.0138	0.0179	0.0301	0.0140	0.0174	-0.4669	0.3590
16070	0.2411	-1.0557	-0.2679	-0.1112	0.0443	0.0228	0.0165	0.0124	0.0084	0.0163	0.0174	0.1959
16073	0.0912	1.5670	-0.7561	0.2150	0.0346	0.0233	0.0361	0.0499	0.0366	0.0195	0.0328	0.2478
16077	0.0482	-0.0808	-0.0599	-0.1325	0.0217	0.0039	0.0065	0.0056	0.0102	0.0171	0.0332	0.2312
16078	0.1469	-0.2147	-0.4583	1.4044	0.0410	0.0270	0.0224	0.0783	0.0192	0.0299	0.1163	-0.2295
16081	0.0649	0.1618	0.1276	0.2091	0.0483	0.0652	0.0668	0.0790	0.0411	0.0766	0.0098	0.1686
16082	0.0817	-0.1742	0.0702	-0.1436	0.0416	0.0263	0.0435	0.0255	0.8263	0.0315	2.5270	-0.1549
16084	0.9326	-0.1032	-0.0956	-2.8744	0.2419	0.0148	0.0120	0.0122	0.0142	0.0215	-0.4570	-1.0355
16089	-0.0783	-0.1441	-0.4363	1.9253	0.0282	0.0246	0.0251	0.0234	0.0237	0.0195	0.0740	-0.2571
16094	0.0431	-0.3574	0.0360	0.2163	0.0338	0.0295	0.0446	0.0383	0.0351	0.0333	0.1023	0.1721
16095	0.0469	-0.2799	1.5115	0.2252	0.0390	0.0339	0.0441	0.0458	0.0395	0.0460	0.0991	0.1229
16096	0.0899	-1.0173	-6.8394	0.0963	0.0530	0.0457	0.0694	0.0460	0.0396	0.0274	0.1642	0.0728
16097	0.0320	0.1088	0.1388	0.0610	0.0251	0.0276	0.1005	0.0583	0.0320	0.0295	0.0607	0.0397
16098	0.0185	0.0580	0.1631	0.0474	0.0291	0.0392	0.0690	0.0531	0.0325	0.0297	0.0423	0.0322
16103	0.2485	-0.2387	-0.1104	0.1509	0.0421	0.0271	0.0133	0.0183	0.0191	0.0465	0.1331	-0.6430
16104	0.0932	0.5133	-0.4198	0.1127	0.0373	0.0171	0.0259	0.0396	0.0325	0.0304	3.0337	1.3357
16106	0.0570	-0.1614	-0.3492	0.6600	0.0396	0.0238	0.0898	0.0340	0.0425	0.0221	0.0697	0.5583
16109	0.0453	-0.2160	-0.2271	26.6065	0.0244	0.0337	0.0300	0.0429	0.0213	0.0229	0.4094	0.3671
16111	0.0284	-1.4491	-0.2655	0.0825	0.0702	0.0277	0.0609	0.0627	0.0254	0.0352	0.0843	0.0923
16114	0.0636	-1.7373	-1.6234	0.1134	0.0359	0.0293	0.0543	0.0531	0.0344	0.0248	2.4657	0.1687
16117	-0.1347	-0.1157	0.2229	0.1821	0.0700	0.0449	0.0923	0.0805	0.0273	0.0247	-0.5963	-4.1387
16120	0.0269	0.1682	11.0553	0.0637	0.0328	0.1471	-0.1488	0.0367	0.0602	0.0191	0.0919	0.0904
16123	0.0354	-0.2122	-0.2025	0.0574	0.0160	0.0107	0.0155	0.0311	0.0312	0.0219	0.1476	-2.9460
16124	0.0485	0.1094	0.1346	0.0293	0.0398	0.0345	0.0629	0.0353	0.0278	0.0194	0.1586	0.0657
16125	0.1356	-0.4714	-1.7417	0.3038	0.0301	0.0362	0.0379	0.0500	0.0285	0.0321	0.1881	0.1270
16126	-0.0914	-0.2000	-0.4879	-0.1487	0.0346	0.0250	0.0176	0.0148	0.0183	0.0280	-1.6249	1.0988
16127	0.0417	1.8534	-0.2422	-0.0871	0.0517	0.0211	0.0414	0.0373	0.0269	0.0148	0.0521	0.2942
16128	0.4592	-0.1540	-0.0531	-0.1623	0.1666	0.0187	0.0278	0.0322	0.0251	0.0294	0.3140	-0.5698
16129	0.0226	0.2282	0.1371	0.0497	0.0578	0.0257	0.0345	0.0429	0.0251	0.0192	0.0605	0.0530
16135	-0.1432	-0.0762	-0.0137	-0.1977	0.0175	0.0101	0.0167	0.0139	0.0136	0.0092	0.1274	-0.1839
16137	0.0582	1.0673	-0.4669	0.2213	0.0442	0.0366	0.0645	0.0746	0.0406	0.0376	0.1427	0.0769
16139	0.0296	-0.1740	-0.2180	0.1302	0.0425	0.0305	0.0408	0.0344	0.0215	0.0126	0.0684	0.3431
16140	0.0209	-0.2663	-0.1661	0.2322	0.0325	0.0223	0.0494	0.0318	0.0299	0.0160	0.1861	-0.7860
16145	0.0801	-0.1277	-0.1258	-0.1504	0.0286	0.0187	0.0342	0.0184	0.0208	0.0626	0.0613	0.1951
16146	0.3307	-0.3173	-0.0869	-0.2624	0.0627	0.0291	0.0120	0.0198	0.0259	0.0212	0.0338	0.0691
16147	0.2350	-0.5689	-0.1195	-0.1264	0.0903	0.0198	0.0454	0.0448	0.0608	0.0190	0.1239	-0.5653
16148	0.2350	-0.5689	-0.1195	-0.1264	0.0903	0.0198	0.0454	0.0448	0.0608	0.0190	0.1239	-0.5653
16151	0.0497	-0.1843	-0.6526	-1.1141	0.0264	0.0276	0.0799	0.0272	0.0353	0.0103	0.0189	0.0530
16152	0.0332	0.0739	0.1362	0.0728	0.0353	0.0385	0.0336	0.0463	0.0427	0.0287	0.0348	0.0346
16154	0.1358	0.1056	-0.1112	-1.9342	0.0350	0.0184	0.0160	0.0315	0.0264	0.0143	0.0290	0.0766
16165	0.0187	0.0878	0.1136	0.0579	0.0229	0.0193	0.0403	0.0274	0.0276	0.0161	0.0353	0.0513
16171	0.0953	-0.1996	-0.1489	-0.2707	0.0420	0.0445	0.0407	0.0304	0.0268	0.0509	0.1216	0.1219

Anexo 2. El Parámetro Lambda para la precipitación mensual de las estaciones de Michoacán

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
16002	0.55	4.20	0.88	4.04	1.56	8.45	17.51	13.97	6.64	1.64	1.51	0.82
16003	0.81	-0.55	-0.66	-2.01	1.27	4.90	4.58	4.56	2.84	1.95	1.10	8.26
16005	0.05	0.02	0.03	0.04	0.10	0.29	0.35	0.35	0.28	0.15	0.05	0.03
16007	0.88	-1.67	-0.33	-0.88	3.37	2.81	8.18	5.30	5.27	1.74	1.20	-0.67
16009	0.10	0.09	0.23	0.14	0.11	0.37	0.45	0.45	0.47	0.29	0.13	0.09
16015	-4.00	-0.35	-0.53	2.55	1.11	4.32	5.66	10.51	6.10	1.67	2.61	-2.10
16016	1.43	2.18	2.73	-5.23	1.69	4.54	11.48	9.03	5.21	1.34	1.60	1.90
16017	4.12	-2.53	-0.55	-14.08	1.21	4.14	6.57	4.04	3.11	1.46	2.45	-3.16
16022	0.92	0.80	1.72	1.13	1.95	4.44	6.29	5.68	3.55	1.83	0.89	0.79
16024	1.70	7.25	-8.17	1.06	1.24	4.77	8.31	2.24	1.31	1.66	0.76	1.44
16025	9.89	-3.73	-0.52	-0.85	4.43	3.21	6.02	6.33	4.00	2.96	7.96	-37.26
16027	0.81	3.00	-3.84	2.48	1.30	6.86	6.95	6.78	5.51	1.53	3.99	2.63
16031	1.07	7.23	-3.46	5.10	1.51	4.94	16.13	13.61	6.37	2.21	1.47	1.27
16035	-35.50	-0.23	-0.10	-0.16	1.66	3.16	4.18	4.45	3.03	1.39	-6.11	-0.58
16036	0.61	2.94	3.15	0.83	0.97	3.10	11.35	8.22	5.02	1.58	0.50	2.73
16043	1.21	3.25	1.62	1.62	1.29	6.93	12.94	10.57	6.20	2.37	0.75	2.21
16048	2.40	6.29	-34.68	2.54	1.27	5.61	13.31	10.63	4.65	1.90	0.83	0.65
16049	1.12	-1.00	-0.42	0.81	1.16	11.11	18.33	8.37	5.48	1.93	1.35	36.15
16050	1.30	7.67	-5.91	1.89	1.78	5.68	10.01	8.97	5.75	2.01	1.57	1.60
16051	-8.05	-0.33	0.04	-0.46	1.60	4.92	6.09	6.38	2.68	1.29	-1.13	-0.70
16052	0.72	-1.37	-2.66	1.23	1.65	5.87	8.90	8.85	4.85	1.69	5.68	2.12
16055	3.12	-1.27	-0.96	4.02	2.88	3.22	4.61	3.81	3.96	2.73	4.33	-31.96
16058	15.60	-0.64	-1.31	1.56	2.39	4.39	5.50	5.07	3.81	1.69	1.27	9.62
16059	-1.63	-0.10	-0.09	-0.26	0.85	3.28	10.21	11.26	6.44	1.24	15.14	-0.40
16060	0.59	1.69	-1.37	0.95	1.59	4.75	11.98	10.82	4.90	2.48	0.84	1.91
16061	2.29	-4.44	-1.86	1.48	2.04	6.97	9.04	11.46	5.24	1.54	1.83	0.95
16062	-0.60	-0.03	-0.23	-0.29	1.00	1.99	2.25	2.77	2.16	2.28	-5.54	-1.14
16063	2.59	1.60	-6.97	-2.09	0.87	4.37	8.08	6.28	2.49	1.11	1.39	1.20
16065	5.51	-1.72	-0.55	0.64	0.87	2.06	3.94	5.81	2.06	1.03	-4.50	2.74
16070	2.71	-0.66	-0.90	-0.53	0.84	3.08	3.86	2.43	2.25	1.75	0.54	1.51
16073	1.85	7.83	-1.69	1.70	0.96	4.34	8.29	10.05	7.93	1.84	0.90	2.46
16077	1.04	-0.95	-0.31	-0.78	1.07	1.19	1.85	1.61	2.46	2.02	1.03	4.31
16078	4.45	-2.26	-4.01	36.77	2.47	4.17	4.76	14.37	2.98	2.13	2.50	-3.47
16081	0.99	1.03	1.51	3.29	2.30	9.15	12.62	12.10	5.75	4.48	0.38	1.58
16082	1.49	-0.46	0.12	-0.55	0.74	3.26	6.09	3.59	102.61	1.43	27.59	-0.57
16084	12.02	-0.78	-0.24	-27.95	6.15	2.00	2.40	2.49	1.93	1.26	-4.31	-8.87
16089	-1.28	-0.33	-0.37	12.17	0.67	3.64	5.46	4.35	4.41	1.69	1.07	-1.74
16094	0.76	-2.66	0.75	2.34	1.42	5.22	8.84	5.82	4.36	1.91	1.56	2.32
16095	0.72	-1.82	8.63	2.02	1.61	5.43	8.39	7.08	4.68	2.52	1.59	1.49
16096	1.39	-6.04	-32.74	0.93	2.01	5.17	11.39	6.89	4.74	1.21	1.63	0.58
16097	0.79	1.35	1.08	1.63	2.08	6.35	29.00	15.75	6.73	3.16	1.67	0.67
16098	0.56	0.79	1.43	1.43	2.63	9.23	20.70	15.07	6.81	3.51	1.12	0.60
16103	4.81	-2.26	-0.56	2.57	1.82	4.73	3.40	4.09	3.42	3.94	2.25	-10.24
16104	1.85	4.36	-3.82	2.25	1.46	2.47	5.48	6.75	4.30	1.67	59.79	18.55
16106	1.27	-1.14	-2.10	6.75	1.54	4.37	20.20	7.28	6.39	1.52	1.28	6.32
16109	0.82	-0.92	-0.64	167.80	0.91	7.71	8.59	10.40	4.59	1.98	9.72	2.78
16111	0.73	-12.77	-2.08	2.04	3.82	3.50	11.14	11.28	3.09	2.55	1.35	1.14
16114	0.95	-8.15	-5.58	1.71	1.58	4.95	11.78	10.62	5.48	1.59	35.28	1.90
16117	-1.84	-0.71	1.89	2.24	1.76	6.07	16.12	11.76	3.33	1.25	-5.28	-38.18
16120	0.47	1.42	87.30	1.26	1.77	20.37	-28.13	5.95	9.29	1.36	1.40	0.86
16123	0.61	-0.90	-0.70	0.86	0.60	1.93	4.59	7.74	6.72	1.58	2.06	-17.55
16124	0.91	1.12	1.39	0.80	2.06	4.62	10.46	6.08	3.56	1.06	2.06	0.72
16125	2.17	-2.08	-10.67	4.69	1.39	5.04	7.26	9.84	4.08	1.89	2.18	1.41
16126	-1.23	-0.95	-1.40	-1.16	0.97	3.79	3.62	2.77	2.85	1.59	-16.52	12.27
16127	1.10	13.60	-1.19	-0.20	1.42	4.62	11.67	7.83	6.55	1.28	1.59	2.86
16128	4.47	-0.14	-0.17	-0.68	2.77	2.25	4.24	4.07	3.34	1.96	4.78	-3.15
16129	0.50	2.24	1.08	1.25	2.93	4.04	7.05	7.93	3.47	1.30	1.13	0.60
16135	-2.29	-0.29	-0.01	-0.86	0.85	2.11	3.47	2.97	2.95	1.08	2.48	-0.80
16137	0.82	5.56	-1.22	2.31	1.60	6.18	14.28	14.74	6.46	2.42	1.85	0.93
16139	0.80	-1.41	-1.55	2.40	2.60	6.62	10.44	8.07	5.46	1.58	2.01	6.10
16140	0.71	-1.91	-1.48	4.16	1.46	4.76	13.19	7.55	7.39	1.56	4.16	-9.48
16145	1.45	-0.48	-0.70	-1.17	1.21	2.62	7.01	3.99	2.81	3.47	1.09	2.86
16146	13.34	-2.34	-0.96	-4.98	1.87	4.50	3.11	5.04	5.64	2.12	1.41	1.82
16147	3.55	-2.01	-0.18	-0.39	1.56	2.63	8.22	6.43	9.79	1.46	1.65	-2.46
16148	3.55	-2.01	-0.18	-0.39	1.56	2.63	8.22	6.43	9.79	1.46	1.65	-2.46
16151	1.28	-1.47	-4.98	-5.40	0.59	3.32	11.94	4.48	6.54	0.99	0.69	1.09
16152	0.74	0.78	1.34	1.55	2.31	5.37	5.59	6.79	5.45	2.08	0.93	0.60
16154	3.37	2.25	-3.32	-29.04	1.53	4.51	4.41	7.96	6.07	2.24	1.78	2.27
16165	0.54	1.04	0.85	0.66	0.81	5.20	13.62	9.31	8.70	2.05	1.07	0.70
16171	1.45	-1.01	-1.15	-4.11	1.72	5.54	7.66	5.72	4.05	3.71	2.19	1.25

